

# Schlussbericht GeReLEO-MODULOS

Förderkennzeichen 50YB1207



# Projekt- und Dokumentinformationen

Projektinformationen	
Verbundprojekt	GeReLEO-MODULOS – Entwicklung eines GeReLEO-Modems für ein Flugexperiment auf einem LEO-Satelliten
Auftraggeber	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Projektträger	DLR Raumfahrtmanagement
Förderkennzeichen	50YB1207
Projektlaufzeit	01.09.2012 bis 31.12.2016
Projektkoordinator	Anton Donner
Projektpartner	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Kommunikation und Navigation, Oberpfaffenhofen Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt (IZR), Gäufelden SINTEC Microwave Systems GmbH, Böblingen

Dokumentinformationen	
Editor	Anton Donner
Sicherheit	öffentlich
Version	1.0

# Freigabe

Aktion	Name/Unterschrift	Organisation	Datum
Erstellt von	Anton Donner et al.	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	16.06.2017
Geprüft von	Zoltán Katona	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	16.06.2017
Freigegeben von	Anton Donner	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	16.06.2017

# Autoren

Name	Organisation	Kontakt
Anton Donner	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	E-Mail: anton.donner@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2883
Hermann Bischl	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	E-Mail: hermann.bischl@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2884
Hartmut Brandt	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	E-Mail: hartmut.brandt@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2843
Zoltán Katona	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	E-Mail: zoltan.katona@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2854

# Änderungsnachweis

Version	Datum	Name	Änderungen
0.9	22.05.2017	Anton Donner	Erste Version
1.0	16.06.2017	Anton Donner	Finale Version

# Vorbemerkung und Danksagung

**Gefördert durch:**



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

Das GeReLEO-MODULOS Projekt wurde vom DLR Raumfahrtmanagement mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50YB1207 gefördert.

Dieser Schlussbericht beschreibt die Arbeiten des DLR-Instituts für Kommunikation und Navigation und ist nicht als abschließender Bericht für die Ergebnisse des gesamten Verbunds zu verstehen. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

An dieser Stelle möchten wir uns herzlich bei unseren Verbundpartnern für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken.

Das DLR Raumfahrtmanagement hat uns in den vergangenen Jahren außerordentlich kompetent und hilfreich begleitet, wofür wir uns ebenfalls herzlich bedanken möchten.

Unser Dank gilt nicht zuletzt der QNX Software Systems Ltd., die uns freundlicherweise für unsere Forschungsarbeiten eine akademische Lizenz der QNX® Software Development Platform zur Verfügung stellte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung</b>	<b>12</b>
1.1	Aufgabenstellung . . . . .	12
1.1.1	Einführung . . . . .	12
1.1.2	Zielsetzung . . . . .	14
1.2	Voraussetzungen . . . . .	15
1.3	Planung und Ablauf . . . . .	16
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand . . . . .	18
1.4.1	Übertragungsverfahren, Zugriffsverfahren und Fehlersicherung . . . . .	18
1.4.2	Verwendung von FPGAs für LEO-Satellitenmodems . . . . .	18
1.4.3	Synchronisationsalgorithmen . . . . .	19
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen . . . . .	20
1.5.1	Verbundpartner . . . . .	20
1.5.2	Arbeitsteilung . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>23</b>
2.1	Ausführlicher Ergebnisbericht . . . . .	23
2.1.1	Systemarchitektur . . . . .	23
2.1.2	Modem Hardware . . . . .	24
2.1.3	Schichtenmodell und Schnittstellen . . . . .	26
2.1.4	Übertragungsprotokoll . . . . .	28
2.1.5	Aufgaben und Aufbau des Data Link Layers (DLLs) . . . . .	32
2.1.6	Entwicklungsumgebung . . . . .	40
2.1.7	Verifizierung . . . . .	40
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises . . . . .	42
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . . . .	44
2.4	Voraussichtlicher Nutzen . . . . .	45
2.4.1	Wissenschaftlicher Nutzen . . . . .	45
2.4.2	Wirtschaftlicher Nutzen . . . . .	45
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt . . . . .	46
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses . . . . .	46
2.6.1	Erfolgte Veröffentlichungen . . . . .	46



2.6.2	Präsentationen und Messen . . . . .	47
2.6.3	Geplante Veröffentlichungen . . . . .	47
2.6.4	Technische Dokumente . . . . .	47
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		<b>48</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>51</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	GeReLEO-Gesamtsystemkonzept mit einem geostationären Relaisatelliten. . . . .	13
1.2	GeReLEO Antennendemonstrator. . . . .	15
1.3	GeReLEO-Anwendungsszenarien. . . . .	16
1.4	Zeitablauf-Diagramm des Projekts. . . . .	17
2.1	GeReLEO-MODULOS Systemarchitektur. . . . .	24
2.2	Blockdiagramm des GeReLEO-MODULOS Modems. . . . .	25
2.3	Schnittstellenkonzept. . . . .	27
2.4	Physical Layer (PHY) Frames. . . . .	28
2.5	Beispiel Übertragungssequenz. . . . .	29
2.6	GeReLEO-MODULOS Protokollschichten und Rahmenstrukturen für den hochra- tigen Link. . . . .	30
2.7	GeReLEO Multi-Frequency Time Division Multiple Access (MF-TDMA) und Time Divi- sion Multiplexed (TDM). Farben symbolisieren die beteiligten Low Earth Orbit (LEO) Satelliten. . . . .	31
2.8	Software-Blockdiagramm des GeReLEO-MODULOS Modems. . . . .	36
2.9	Zustandsautomat aus der Sicht des Physical Layer Interface (PHYIF) Moduls. . . . .	37
2.10	Kompletter Zustandsautomat im MACTX Modul. . . . .	39
2.11	Modell des PHY für Testzwecke. . . . .	41
2.12	Breadboard-Modem für die Softwareentwicklung und Verifizierung. . . . .	42
2.13	GeReLEO-MODULOS Demonstrationsaufbau. . . . .	43
2.14	GeReLEO-MODULOS Ausstellungsstand bei der 5. Nationalen Konferenz Satelliten- kommunikation in Deutschland. . . . .	43

# Tabellenverzeichnis

2.1	Modulations- und Codierungsarten (ModCods) für den niederratigen Link. . . . .	32
2.2	ModCods für den hochratigen Link. . . . .	33
2.3	Parametrisierung des RLE Protokolls. . . . .	38
2.4	Bewilligte Positionen laut Änderungsbescheid vom 10.11.2016 und tatsächliche Ausgaben (jeweils in Euro). . . . .	44

# Kapitel 1

## Kurzdarstellung

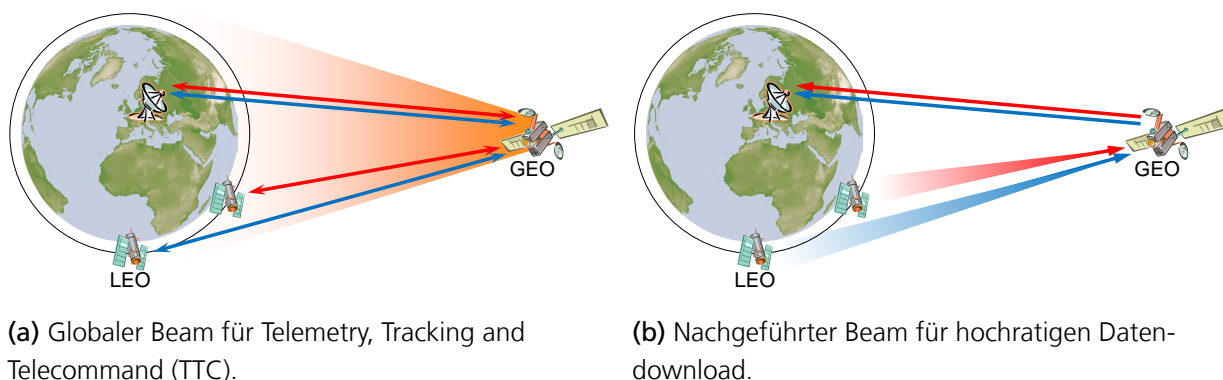
### 1.1 Aufgabenstellung

#### 1.1.1 Einführung

Low Earth Orbit (LEO) Satelliten (z.B. Erdbeobachtungssatelliten) sind aufgrund ihrer geringen Bahnhöhe für einen Beobachter auf der Erde nur für kurze Zeit sichtbar. Je nach Satellitenorbit und Breitengrad der Bodenstation können sogar mehrere Stunden zwischen zwei Überflügen vergehen. Insbesondere bei polaren/sonnensynchronen Orbits sind oftmals kostspielige Anlagen nahe den Polen notwendig, um die zeitlichen Abstände zwischen Überflügen zu minimieren und um genügend lange Zeitfenster für den Download von Sensordaten zu haben. Durch die Verwendung von immer leistungsfähigeren Sensoren mit höheren Auflösungen wird insbesondere der Datendownload zum Flaschenhals. Gleichzeitig besteht oftmals der Wunsch, die Satelliten bzw. die Nutzlasten möglichst kurzfristig oder sogar in Echtzeit steuern zu können.

Für einen geostationären Relaisatelliten ist ein LEO Satellit auf mehr als der Hälfte seiner Umlaufbahn sichtbar. Die Vorteile liegen auf der Hand: Steuerbefehle zu und Telemetrie-/Sensordaten von einem LEO Satelliten können kontinuierlich über einen wesentlich längeren Zeitraum übertragen werden. Auf dem LEO Satellit sind somit geringere Spitzensendeleistungen für die zu erreichenden hohen Datenraten erforderlich. Zudem können mögliche Echtzeitanforderungen der Satellitenmission leichter erfüllt werden als mit einem weltweiten Bodenstationsnetzwerk. Eine einzige, eventuell durch Redundanz gesicherte, Ankerstation kann zur Übermittlung der Daten ausreichend sein.

Im Rahmen des GeReLEO-MODULOS Projekts wurde ein Teilaspekt des Gesamtsystemkonzepts weiter verfolgt: Die Entwicklung eines experimentellen LEO-Satellitenmodems bis zur Engineering Model (EM) Reife. Für die dazu benötigten Protokollschichten zur Realisierung der kanaladaptiven Ka-Band-Übertragungs- und Zugriffsverfahren konnte auf Teilentwicklungen aus dem Vorgänger-



**Abbildung 1.1:** GeReLEO-Gesamtsystemkonzept mit einem geostationären Relaisatelliten.

projekt GeReLEO [Bis+13] zurückgegriffen werden. Es waren jedoch zusätzliche Forschungsarbeiten und Neuentwicklungen erforderlich.

Das übergeordnete Ziel von GeReLEO-MODULOS war die Erforschung von kanaladaptiven Ka-Band-Übertragungs- und Zugriffsverfahren in der Zielkonfiguration. Das zu realisierende Modell eines LEO-Satellitenmodems ist ein notwendiger Schritt für die mögliche spätere Durchführung von wissenschaftlichen Satellitenkommunikationsexperimenten in einem realen Datenrelais-Satellitensystem.

Zu diesem Zweck sollten Kommunikationsexperimente mit allen signalabschwächenden und –störenden Einflüssen eines emulierten Übertragungskanal (z.B. Doppler-Verschiebung, Phasenrauschen, Regendämpfung, Freiraumdämpfung, Interferenzen) durchgeführt werden. Hierzu wurde von den Projektpartnern Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt (IZR) und SINTEC Microwave Systems GmbH (SINTEC) ein EM des LEO-Satellitenmodems entwickelt, das in Form, Passung und (kritischer) Funktion einem möglichen späteren Engineering Qualification Model (EQM) bzw. dem Flugmodell entspricht. Des Weiteren sollte das EM ersten Qualifikationstests (mechanische und thermische Tests) unterzogen werden. Somit wurde im Projekt ein Technology Readiness Level (TRL) [ECS14] von 5 angestrebt. Im Bodensegment musste die Software für ein Bodenstationsmodem entwickelt werden.

Die Erkenntnisse aus diesen Kommunikationsexperimenten sollen später in die Entwicklung eines operationellen kanaladaptiven Übertragungs- und Zugriffsverfahrens einfließen. Zwei Anwendungsfälle wurden untersucht:

- Niederratige bidirektionale Datenübertragung für TTC von LEO-Satelliten (Abbildung 1.1a).
- Hochratige unidirektionale Datenübertragung für den Download großer Datenmengen von einem LEO Satelliten zum Boden (Abbildung 1.1b).

Die Hardware-Architektur des EM wurde nahezu vollständig neu konzipiert und unterscheidet sich erheblich vom bestehenden Labordemonstratorsystem. Deswegen musste auch die Software an die neue Zielplattform angepasst und wesentlich erweitert werden. Der Entwicklungsbedarf im

Projekt GeReLEO-MODULOS umfasste im Einzelnen:

- Die Neuentwicklung der Hardware (EM) eines Modems für den Mitflug auf einem LEO Satelliten.
- Soweit möglich eine Anpassung einiger bereits aus dem Vorgängerprojekt GeReLEO vorhandener Software-Module an diese neue Hardware-Architektur.
- Die Neuentwicklung von Software-Modulen, die im Vorgängerprojekt GeReLEO für das Labordemonstrationssystem nicht benötigt und deshalb auch nicht erstellt wurden. Diese neu zu entwickelnden Software-Module stellten den Hauptteil der Software-Arbeiten dar und betrafen beispielsweise:
  - Die Module für die Anbindung an den Satellitenbus, welche im Labordemonstrationssystem nur mittels eines Ethernetanschlusses zu einem PC nachgebildet wurden.
  - Die vollständigen Protokollschichten, die in der Labordemonstration des Projekts GeReLEO als Minimalkonfiguration implementiert wurden. Diese mussten in Form einer Software-Neuentwicklung vollständig für die Zielhardware realisiert werden.

Ein wesentliche Anforderung bei der Entwicklung des EM war die In-Orbit Rekonfigurierbarkeit des LEO-Satellitenmodems.

Für das neu zu entwickelnde EM sollten im Bereich der Algorithmen grundsätzlich die Verfahren aus dem GeReLEO Projekt verwendet bzw. daran angeknüpft werden.

### 1.1.2 Zielsetzung

Das DLR-Institut für Kommunikation und Navigation (DLR-KN) zeichnete sich im GeReLEO-MODULOS Projekt im Wesentlichen für das Data Link Layer (DLL) Protokoll verantwortlich und entwickelte die Protokollsoftware sowohl für das EM des Satellitenmodems als auch für das Bodenstationsmodem. Kernanforderungen waren unter anderem:

- Mehrfrequenz-Zeitmultiplex für die gleichzeitige Kommunikation mit mehreren Satelliten;
- Unterstützung von Adaptive Coding and Modulation (ACM), Variable Coding and Modulation (VCM) und Constant Coding and Modulation (CCM);
- Uneingeschränkte Skalierbarkeit des Systems: Maximale Flexibilität des Radioressourcenmanagements durch die Verwendung von variablen Zeitschlitzten, Schutzzeiten sowie dynamische Frequenzzuweisung und weitere Mechanismen, die die Einhaltung von Service Level Agreements (SLAs) ermöglichen;
- Plattformunabhängigkeit der Softwarearchitektur für nachhaltige Verwendung bzw. Verwertung der erzielten Ergebnisse.

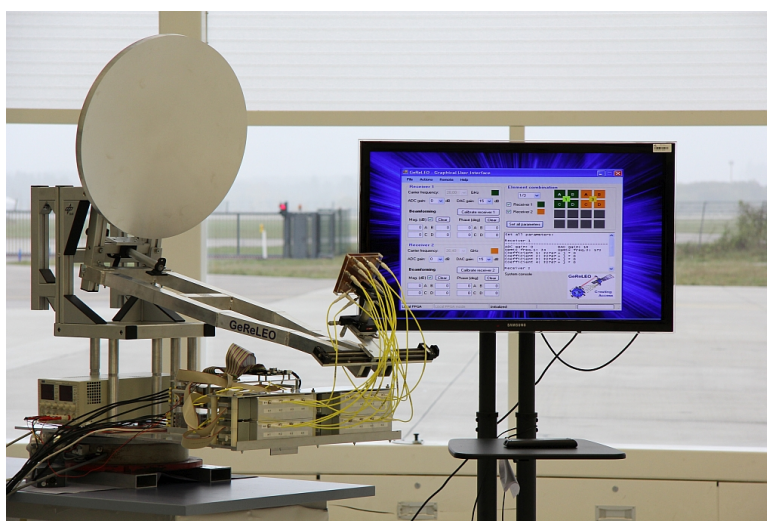


Abbildung 1.2: GeReLEO Antennendemonstrator.

## 1.2 Voraussetzungen

Im Vorgängerprojekt GeReLEO [Bis+13] wurde bereits ein Gesamtsystemkonzept für ein geostationäres Relaisatellitensystem entwickelt. Hauptbestandteil ist eine Ka-Band Multibeam-Empfangsantenne für den geostationären Relaisatelliten (siehe Abbildung 1.3b). Mittels eines starren Hauptreflektors und digitaler Strahlformung erlaubt diese Antenne sowohl mehrere gleichzeitige nieder- ratige Verbindungen als auch das schnelle Umschalten zwischen LEO Satelliten bei hohen Datenübertragungsraten. Abbildung 1.2 zeigt den GeReLEO-Labordemonstrator dieser Antennentechnologie. Das hierfür notwendige Micro-Electromechanical Structure (MEMS) basierte Schaltmodul wurde für das GeReLEO Projekt von Grund auf neu konzipiert.

Neben der Antennenhardware wurden die Grundlagen neuer kanaladaptiver Übertragungsverfahren sowohl für die Satellitensteuerung und Bahnverfolgung als auch für die hochratige Übertragung der Nutzdaten entwickelt. Vorwärtsfehlerkorrektur und Modulationsverfahren wurden an die Antenneneigenschaften, an den zeitvarianten Abstand zwischen den Satelliten bzw. an die tatsächlichen atmosphärischen Verhältnisse zwischen dem geostationären Satelliten und der Bodenstation angepasst, so dass die zur Verfügung stehende Bandbreite und Sendeleistung zu jeder Zeit optimal ausgenutzt wird. Zudem wurde ein Datenübertragungsprotokoll entworfen, das mittels Zeitmultiplexverfahren die gleichzeitige niederratige Datenübertragung von und zu mehreren Erdbeobachtungssatelliten erlaubt. Zur Verifizierung der gewählten Ansätze wurde ein Labordemonstrator entwickelt, mit dem die Prinzipien der Protokollschichten und der einzusetzenden Modulations- und Codierungsverfahren nachgewiesen werden konnten. Entsprechend Referenz [ECS14] wurde somit ein TRL von 4 erreicht.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Datenübertragung im Ka-Band nicht als Konkurrenz zu optischen Intersatelliten-Links zu sehen ist, sondern als Ergänzung. Das Systemkonzept eignet sich

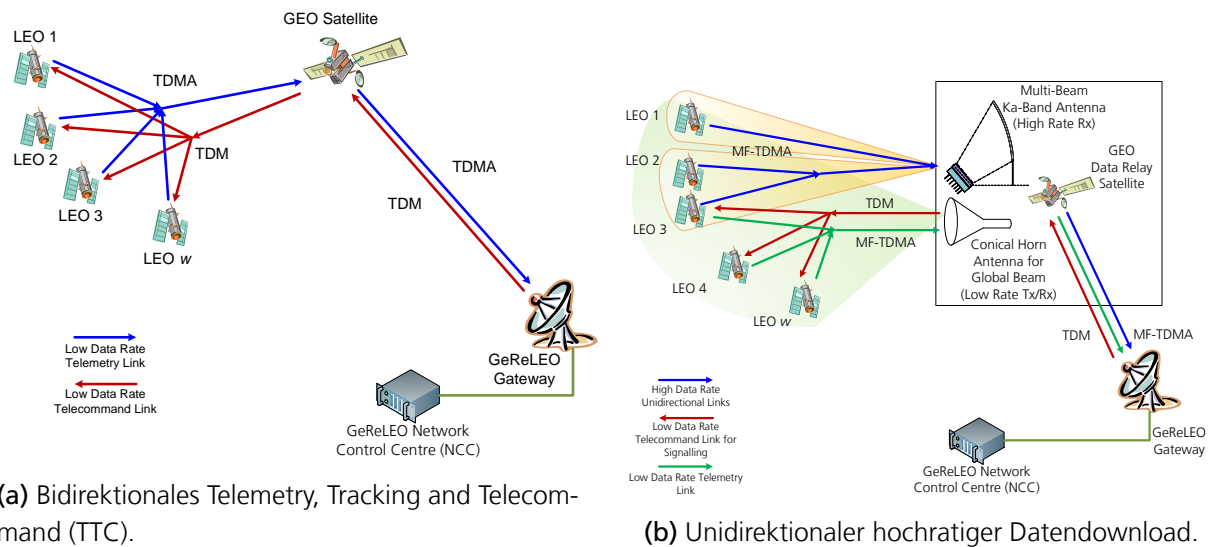


Abbildung 1.3: GeReLEO-Anwendungsszenarien.

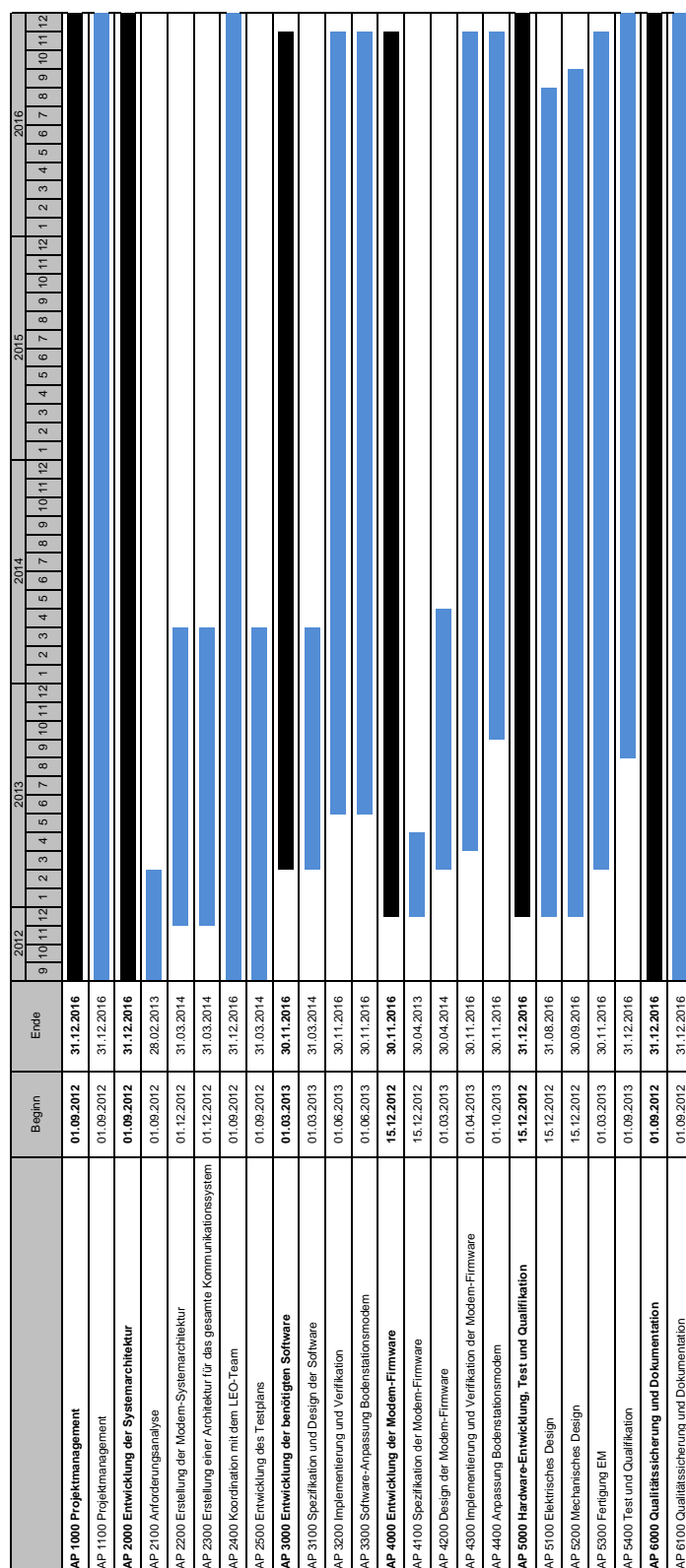
insbesondere für einzelne oder eine Flotte von kleinen LEO Satelliten mit geringer Masse und stark beschränkter elektrischer Leistung.

## 1.3 Planung und Ablauf

Das Zeitablauf-Diagramm (Gantt-Diagramm) des Projekts ist in Abbildung 1.4 dargestellt. Im Hinblick auf die ursprüngliche Arbeits- und Zeitplanung hat sich der Abschluss der Arbeiten deutlich verzögert. Die Projektlaufzeit musste von ursprünglich 24 Monaten auf insgesamt 52 Monate kostenneutral verlängert werden.

Die Verzögerungen wurden im Wesentlichen durch Probleme beim Aufbau der Hardware des LEO-Modem EM verursacht. Die damit betrauten Projektpartner hatten beispielsweise erhebliche Schwierigkeiten mit dem Aufbau von Qualifikationsmodellen für Baugruppen und Bauelemente.





**Abbildung 1.4:** Zeitablauf-Diagramm des Projekts.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

### 1.4.1 Übertragungsverfahren, Zugriffsverfahren und Fehlersicherung

Modems für die Weltraumkommunikation verwenden häufig Übertragungsverfahren, die vom Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) [ETS14b] definiert wurden. Diese Übertragungsverfahren haben für das betrachtete Anwendungsszenario einige Nachteile. Im Einzelnen sind dies:

- Veraltete Codes für die Vorwärtsfehlerkorrektur und dadurch Notwendigkeit erhöhter Sendeleistungen.
- Keine dynamische Anpassung der Codierung und Modulation an den zeitlich veränderlichen Übertragungskanal und dadurch keine optimale Ausnutzung der Übertragungsressourcen (das Übertragungsverfahren muss immer unter Worst-Case Annahmen arbeiten).
- Keine Möglichkeit, mehrere kleine LEO Satelliten gleichzeitig zu unterstützen (kein Mehrfachzugriffsverfahren).

Naturgemäß eignen sich leistungseffiziente Fehlersicherungs-codes gut für die Geostationary Orbit (GEO) Datenrelais Anwendungsszenarien. Eine vom DLR-KN entwickelte Low-Density-Parity-Check (LDPC) Codefamilie wird deshalb im GeReLEO-MODULOS Modem verwendet. ACM, VCM und CCM wurden für die Satellitenkommunikation erstmals in der Digital Video Broadcasting – Satellite – Second Generation (DVB-S2) Norm eingesetzt [ETS14a]. Diese Norm ist allerdings für GEO-Datenrelais-Anwendungen wegen zu großer Paketlängen und zu langer Resynchronisationszeiten nach Linkunterbrechungen (kein Time Division Multiplex Access (TDMA) Betrieb möglich, ineffizient bei Beam-Handover) nicht geeignet. Für die Datenrelais-Anwendungsszenarien waren deshalb Neuentwicklungen hinsichtlich der adaptiven/variablen Codierung und Modulation erforderlich.

Mehrfachzugriffsverfahren für die Satellitenkommunikation zur Unterstützung vieler Terminals wurden bisher z.B. in der Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite (DVB-RCS) Norm realisiert [ETS09]. Dieses Zugriffsverfahren ist für große Benutzergruppen konzipiert und deswegen sehr aufwändig gestaltet. Für die Anwendung bei einem GEO-Datenrelais war ein vereinfachtes Zugriffsverfahren wünschenswert, das bis zu ca. 15 LEO Satelliten unterstützt.

### 1.4.2 Verwendung von FPGAs für LEO-Satellitenmodems

Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) wurden bisher nur selten im Weltraum eingesetzt, da sie als anfällig gegenüber Single-Event Upsets (SEUs) gelten. Erst seit wenigen Jahren sind strahlungstolerante FPGAs erhältlich, die eine höhere Immunität gegenüber Strahlung aufweisen. Mit dieser

vergleichsweise jungen Technik gibt es noch wenige Erfahrungen. Trotzdem haben FPGAs gegenüber herkömmlichen Lösungen einige gewichtige Vorteile:

- FPGAs bieten gegenüber Lösungen mit einer Central Processing Unit (CPU) den Vorteil einer geringeren Leistungsaufnahme bei gleichzeitig höherer Rechenleistung, da der FPGA speziell für den vorgesehenen Anwendungsfall konfiguriert werden kann.
- Gegenüber einem Application Specific Integrated Circuit (ASIC) hat ein FPGA den Vorteil, dass er nahezu beliebig oft rekonfiguriert werden kann. Bei einem einmal entwickelten ASIC ist dies nicht mehr möglich.

Besonders die Möglichkeit der Rekonfiguration durch ein Softwareupdate ist für Satellitenanwendungen sehr interessant. Die neue FPGA-Netzliste kann beispielsweise über den User Link oder den Telecommand Link an den Satelliten gesendet und installiert werden. Damit lassen sich beispielsweise Alterungseffekte, wie sie Travelling Wave Tube Amplifiers (TWTAs) und analoge Filter aufweisen, durch so genannte Predistortion-Techniken zu kompensieren. Ein FPGA-basiertes Satellitenmodem kann auch als Testplattform für neue Übertragungsverfahren genutzt werden. Damit können diese Verfahren in einer realen Umgebung verifiziert werden.

Um den Effekten der Weltraumstrahlung, wie beispielsweise Single Event Effect (SEE), SEU etc., Rechnung zu tragen, sind verschiedene Maßnahmen bekannt, die Fehler erkennen und korrigieren können. Das Zusammenspiel solcher Verfahren und die Häufigkeit des Auftretens von Strahlungseffekten sind von großem Interesse für kommerzielle Anwendungen. Da die Datengrundlage noch relativ dünn ist (oder nur beschränkt zugänglich), wird der Erkenntnisgewinn durch Untersuchungen im realen Flug sehr groß sein.

### 1.4.3 Synchronisationsalgorithmen

In aktuellen Satellitenkommunikationssystemen erfolgt beim Verbindungsaufbau die Synchronisierung am Empfänger üblicherweise in mehreren Schritten. Zunächst wird lediglich der unmodulierte Träger gesendet. Dabei muss die Frequenz des Oszillators an der Bodenstation langsam in einem Bereich variiert werden, der im Wesentlichen durch die maximal auftretende Dopplerverschiebung vorgegeben ist. Erst nachdem der Empfänger auf die korrekte Frequenz eingerastet ist, wird eine Akquisitionssequenz übertragen, die zur zeitlichen Synchronisierung des Basisbandsignals dient. Sowohl bei der Träger- als auch bei der Symboltakt-Synchronisation kommen in der Regel einfache Closed-Loop-Verfahren zum Einsatz. Bis zum Beginn der Datenübertragung können so mehrere Sekunden bis zu einigen Minuten vergehen. Dies ist für die im Projekt GeReLEO angedachten Szenarien, bei denen regelmäßige Unterbrechungen der Verbindung durch den TDMA-Betrieb mehrerer Satelliten bzw. das Umschalten zwischen Antennenelementen im hochratigen Link auftreten, nicht akzeptabel. Darüber hinaus werden aufgrund der adaptiven/variablen Codierung und Modulation im Modem Synchronisationsverfahren benötigt, die nicht nur für ein bestimmtes Signal-zu-Rauschleistungsverhältnis ausgelegt sind, sondern einen großen Dynamikbereich abdecken.

Derartige Verfahren sind bislang noch nicht unter realistischen Bedingungen getestet worden. Im Rahmen von GeReLEO-MODULOS wurde auf dem EM der Entwicklungsstand aus dem GeReLEO Projekt implementiert. Eine Weiterentwicklung war für das EM nicht vorgesehen, kann jedoch für das spätere EQM bzw. Protoflight Model (PFM) oder Flight Model (FM) in Erwägung gezogen werden.

Die Synchronisierung stellt unter den in diesem Projekt betrachteten Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar, da bei der Übertragung über einen geostationären Relais-Satelliten im Ka-Band im Vergleich zu einem konventionellen direkten Bodenlink im S-Band deutlich größere Dopplerverschiebungen auftreten. Diese müssen möglichst gut anhand der aktuellen Satellitenpositionen und -geschwindigkeiten korrigiert werden, da ansonsten am Empfänger keine Möglichkeit besteht, das übertragene Nutzsignal zuverlässig zu detektieren. Entsprechende Ansätze sind bislang nur optional für Bodenstationen vorgesehen. Um mehrere Satelliten gleichzeitig mit einem Bodenstationsmodem unterstützen zu können, muss die Dopplerkompensation jedoch sowohl sende- als auch empfangsseitig auf den Satelliten erfolgen, da jeder einzelne Satellit einen unterschiedlichen Frequenzversatz aufweist. Dies sollte erstmalig im GeReLEO-Modem realisiert werden.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### 1.5.1 Verbundpartner

#### **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Kommunikation und Navigation (DLR-KN)**

Das DLR-Institut für Kommunikation und Navigation (DLR-KN) forscht seit vielen Jahren international äußerst erfolgreich an neuen Übertragungsverfahren, Datenübertragungsprotokollen und Algorithmen für die Satellitenkommunikation von morgen und übermorgen. Angewendet werden sie bei der flächendeckenden Versorgung mit Multimediaminhalten, ebenso wie bei der Internetanbindung von Satelliten, Flugzeugen oder entlegenen Gebieten. Durch die integrierte Betrachtung der relevanten Fachgebiete erarbeitet das Institut hochgradig innovative Systemkonzepte für herkömmliche transparente, aber auch für regenerative Satellitenplattformen mit On-board Prozessoren.

Dieses in Deutschland einzigartige Know-How wurde vom Institut über viele Jahre hinweg in zahlreichen Forschungsprojekten gewonnen. Beispiele sind verschiedene Projekte im Auftrag der European Space Agency (ESA) zur Analyse und Optimierung von neuen Ka-Band Multibeam-Satellitensystemen und von neuen Ka-Band Systemen mit On-board Prozessierung.

Die Fachabteilung "Satellitennetze" zeichnete sich im Projekt für die wissenschaftlich-technischen Inhalte verantwortlich. Insbesondere wurden im Projekt GeReLEO-MODULOS das Kommunikationsprotokoll (DLL und Schnittstellen zu angrenzenden Protokollschichten) für das LEO-Satelliten-

modem und das Bodenstationsmodem entwickelt, welches eine adaptive/variable Codierung und Modulation und den Vielfachzugriff für mehrere LEO Satelliten unterstützt.

Für die Koordinierung des Gesamtprojekts war die Abteilung "Institutsprojektmanagement und Institutsadministration" zuständig.

### **Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt (IZR)**

Als eines von weltweit 500 Unternehmen aus dem Steinbeis Verbund bietet das Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt praxisorientierte Problemlösungen für die konkrete wirtschaftliche Nutzung. Bei den Projekten geht es um den Transfer von Erkenntnissen aus der Raumfahrttechnik für klein- und mittelständische Unternehmen und um Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu dieser Thematik. Zu den weiteren Dienstleistungen gehören die technische Beratung, die Erstellung von Gutachten und Studien sowie Ingenieursdienstleistungen wie z.B. Apparateauslegung. Der Schwerpunkt des IZR liegt im Bereich Hardwareentwicklung für Raumfahrtanwendungen und der Programmierung von FPGAs. Das IZR war an mehreren erfolgreich verlaufenen Flugexperimenten beteiligt (z.B. GTS – Global Transmission Services) und hat deshalb Erfahrung in der Entwicklung flugtauglicher Hardware.

### **SINTEC Microwave Systems GmbH (SINTEC)**

Die SINTEC Microwave Systems GmbH (SINTEC) mit Firmensitz in Böblingen ist ein hochspezialisiertes Kleinunternehmen. Die fünf Mitarbeiter der SINTEC haben ihren Schwerpunkt auf die Entwicklung und Fertigung von Radarsystemen und Sende- und Empfangstechnik für Satellitenkommunikation und -navigation gelegt. Die Radarsysteme werden einerseits eingesetzt zur Bodenerkundung. Andere Systeme im K-Band sind als Winkel- und Geschwindigkeitsmesser aufgebaut. Im Rahmen mehrerer ESA-Projekte wurde eine Vielzahl von Modulen und Baugruppen als Flughardware für verschiedene Satelliten entwickelt. SINTEC hat sich auf die flexible Realisierung von individuellen Lösungen für kleine Stückzahlen, wie sie in der Satelliten- und Verteidigungstechnik häufig anzutreffen sind, spezialisiert. Für die Bestückung der Baugruppen steht eine ISO9001:2000-zertifizierte SMD-Fertigungslinie zur Verfügung. Hier werden kleinere Losgrößen inhouse gefertigt und getestet.

### 1.5.2 Arbeitsteilung

#### **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Kommunikation und Navigation (DLR-KN)**

Der Beitrag des DLR-KN im Projekt GeReLEO-MODULOS bestand im Wesentlichen neben der Projektkoordinierung in der Entwicklung und Realisierung der Software des Kommunikationsprotokolls (Data Link Layer (DLL) und Schnittstellen zu den angrenzenden Protokollschichten) sowie in der Durchführung von Funktionstests für das LEO-Satellitenmodem und für das Bodenstationsmodem hinsichtlich der Kommunikationsprotokolle.

#### **Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt (IZR))**

Das IZR entwickelte die Hardware des Modems inkl. der Software für die physikalische Protokollschicht. Außerdem entwickelte und implementierte das IZR die deterministische Dopplerkompensation anhand der Positionsdaten des Satelliten.

#### **SINTEC Microwave Systems GmbH (SINTEC)**

Im Projekt entwickelte SINTEC die komplette Hardware für den digitalen Teil des Modems: Up- und Downconverter und die Power Distribution & Control Unit. Die Analogue-to-Digital Converter (ADC) and Digital-to-Analogue Converter (DAC) sind ebenfalls Eigenentwicklungen von SINTEC.

## Kapitel 2

# Eingehende Darstellung

### 2.1 Ausführlicher Ergebnisbericht

#### 2.1.1 Systemarchitektur

Abbildung 2.1 beschreibt die grundlegende Systemarchitektur. Im Wesentlichen besteht das Datenrelaissystem aus folgenden Komponenten:

- Modems mit Ka-Band Frontends sowohl an Bord der LEO Satelliten als auch am GeReLEO-Gateway.
- Das GeReLEO Network Control Centre (NCC) für das Radio Resource Management (RRM).
- Eine Datenrelais-Nutzlast auf dem GEO Satelliten (Ka-Band), die vom NCC über das GEO Gateway gesteuert wird.

Als Rückfallebene sind dedizierte TTC Gateways mit direkten Links zu den jeweiligen LEO Satelliten denkbar.

Die Kommunikation vom GeReLEO-Gateway zu den LEO Satelliten (niederratiges Telecommand) erfolgt mittels TDM; in der Gegenrichtung (niederratige Telemetry und hochratiger Download von Sensordaten) wird MF-TDMA eingesetzt.

Eine durchaus realistische Annahme ist, dass sowohl die LEO Satelliten als auch das GeReLEO-Gateway mit Global Navigation Satellite System (GNSS) Empfängern ausgestattet sind, die sowohl der genauen Positionsbestimmung als auch als Zeitnormale dienen.

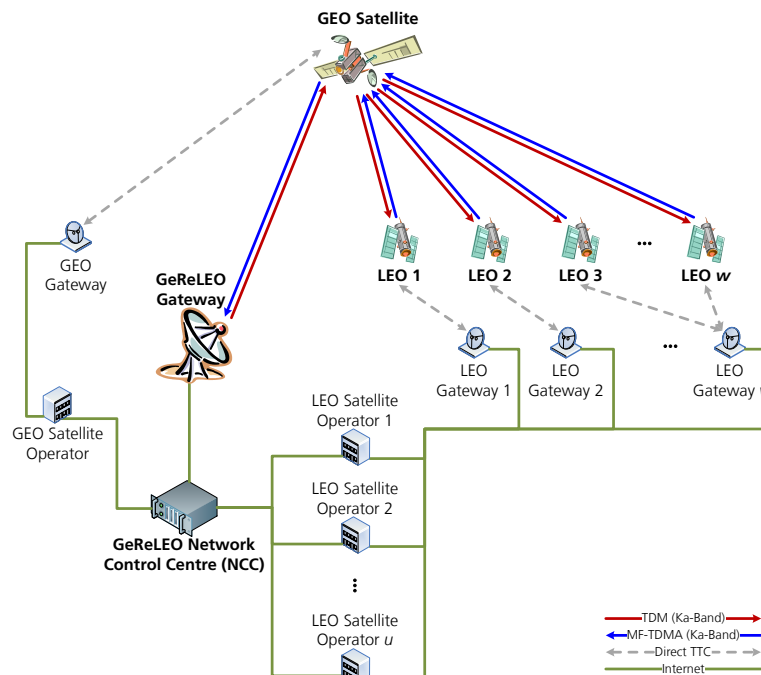


Abbildung 2.1: GeReLEO-MODULOS Systemarchitektur.

### 2.1.2 Modem Hardware

Im Rahmen des GeReLEO-MODULOS Projekts sollte ursprünglich der Xilinx Virtex-4QV XQR4VFX140 (column grid array, CF package code) verwendet werden. Xilinx lässt dieses FPGA-Produkt seit 2014 von einem anderen Zulieferer fertigen, der allerdings zuerst noch aufwändig qualifiziert werden musste [Xil13].

Das Konsortium hatte sich deswegen zu Projektbeginn darauf geeinigt, auf die neuen und zukunftsicheren Zynq-7000Q zu setzen, die ARM-Prozessoren besitzen und weniger elektrische Leistung aufnehmen. Die Prozessoren werden für die höheren Protokollschichten verwendet; die performancekritische Vorwärtsfehlerkorrektur, die (De-)Modulation, die Synchronisierungsalgorithmen und die Dopplerkorrektur im PHY wurden für den FPGA implementiert. Das Konsortium sah den Hauptvorteil in der weitgehend unabhängigen Entwicklung und Testung der Softwarekomponenten durch die Projektpartner DLR-KN und IZR, was die Qualität und somit die Zuverlässigkeit der Software wesentlich steigerte.

Abbildung 2.2 zeigt das Blockdiagramm des GeReLEO-MODULOS Modems mit den wichtigsten externen und internen Schnittstellen. Als Entwicklungsumgebung wurde das Xilinx® Zynq®-7000 All Programmable SoC ZC706 Evaluation Kit [Xil16] eingesetzt. Die wichtigsten Bestandteile des Modems sind:

- Das Gehäuse des EMs ist ein Design von Projektpartner IZR.
- Low Noise Amplifier (LNA), Ka-Band Up- und Down-Converter sind Neuentwicklungen von



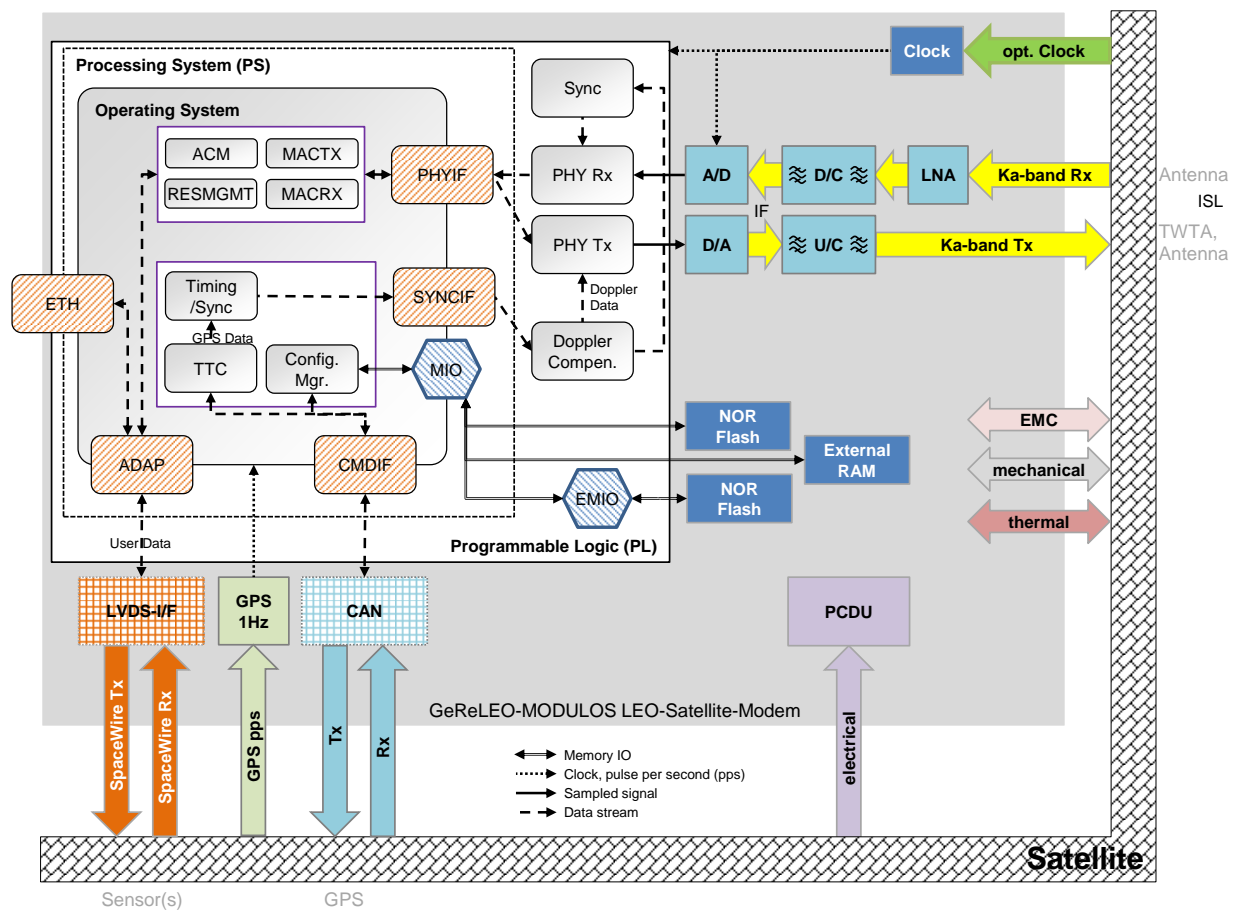


Abbildung 2.2: Blockdiagramm des GeReLEO-MODULOS Modems.

Projektpartner SINTEC.

- Die ebenfalls von SINTEC entwickelten ADC and DAC wurden mittels FPGA Mezzanine Cards an das Evaluation Kit angeschlossen.
- Die Software für die Programmable Logic (PL) bzw. für den FPGA mit der digitalen Signalverarbeitung (Doppler-Kompensation, Synchronisierung, (De-)Modulation) und der Vorwärtsfehlerkorrektur wurde von Projektpartner IZR entwickelt.
- DLR-KN entwickelte im Rahmen des Projekts die Software für die höheren Protokollschichten. Dazu gehören u.a. Medium Access Control (MAC), Resource Management (RESMGMT) und die Steuerung des ACM. Diese Software läuft als Applikation des Realzeit-Betriebssystems QNX (6.5.0 SP1) auf dem Processing System (PS), d.h. auf den ARM-Prozessoren des Zynq-Boards.
- Die internen Schnittstellen Synchronisation Interface (SYNCIF) und PHYIF zwischen PS und PL sind ARM Advanced Microcontroller Bus Architecture (AMBA)<sup>®</sup> Advanced Extensible Interface (AXI) Interfaces.
- Mittels Memory Input/Output (MIO) Interface werden die Speichermodule angebunden.
- Ethernet (ETH) wird für das Bodenstationsmodem bzw. für die Entwicklungsarbeiten benötigt.
- Als hochratige Verbindung zum Satellitenbus kann beispielsweise ein SpaceWire oder ein Controller Area Network (CAN) Bus Interface über den Adaptation Layer (ADAP) angeschlossen werden.
- Der Anschluss für TTC erfolgt entweder über ein MIL-STD-1553 (MIL-Bus) Interface (als externer Hardware-Baustein oder als Firmware/Software in der PL implementiert), oder über den im Zynq-Board bereits vorgesehenen CAN Bus, oder als serieller Anschluss (z.B. RS-485).
- Als Zeitnormal wird ein GPS Pulse per Second (PPS) angeschlossen.

### 2.1.3 Schichtenmodell und Schnittstellen

#### Überblick

Abbildung 2.3 zeigt ein stark vereinfachtes Schichtenmodell der GeReLEO-MODULOS Kommunikationsprotokolle. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier weder Satellitenbetreiber noch Gateway-Stationen berücksichtigt (vgl. Abbildung 2.1). Daraus ergeben sich naheliegenderweise drei Schnittstellentypen:

**Inter-Node Interfaces** für die horizontale Kommunikation zwischen den jeweils gleichen Protokollschichten verschiedener Knoten,

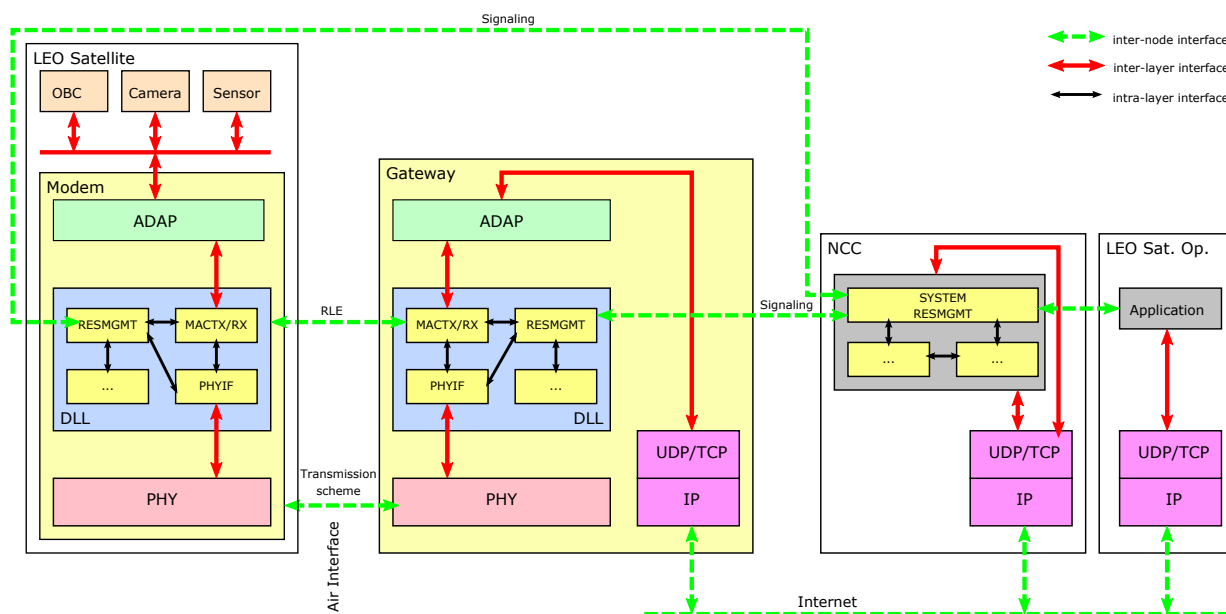


Abbildung 2.3: Schnittstellenkonzept.

**Inter-Layer Interfaces** für die vertikale Kommunikation zwischen den Schichten eines Knotens und

**Intra-Layer Interfaces**, die die Kommunikation zwischen den internen Modulen einer Protokollschicht realisieren.

Die prinzipielle Software-Architektur des Modems ist ebenfalls aus Abbildung 2.3 ersichtlich. Der vom DLR-KN entwickelte DLL ist mit dem darunter liegendem PHY über das PHYIF verbunden. Die Anbindung mit der Data I/O Schicht (höhere Protokollschichten) erfolgt über den Adaptation Layer (ADAP). Beide angrenzende Protokollschichten wurden vom Projektpartner IZR entwickelt.

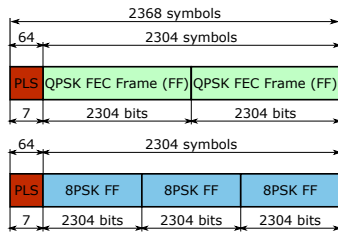
Die Entwicklungsarbeiten bei beiden Partnern profitierten von der erforderlichen klaren Schnittstellenbeschreibung und –dokumentation. Die Protokollschichten konnten unabhängig voneinander optimiert werden und die Schnittstellenbeschreibung erlaubte die Durchführung von ausführlichen Softwaretests sowohl von Seiten der eigentlichen Applikation (Nutzdaten) als auch von Seiten der physikalischen Protokollschicht.

Der wesentliche Vorteil dieser Lösung bezüglich späterer Verwertung ist, dass die Implementierung des DLLs und der höheren Protokollschichten nicht nur auf der GeReLEO-MODULOS Hardware lauffähig ist, sondern auf nahezu beliebigen Zielplattformen eingesetzt werden kann.

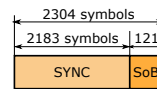
## Unterschiede zwischen LEO-Satellitenmodem und Gateway Modem

Das GeReLEO-Konzept beruht auf einer Sterntopologie: Eine zentrale Gateway-Station bedient mehrere LEO Satelliten. Deswegen sind die Basisfunktionalitäten der DLLs von LEO-Satellitenmo-

#### Low Data Rate Physical Layer Data (PLD) Frames



#### Synchronisation Frame



#### High Data Rate Physical Layer Data (PLD) Frames

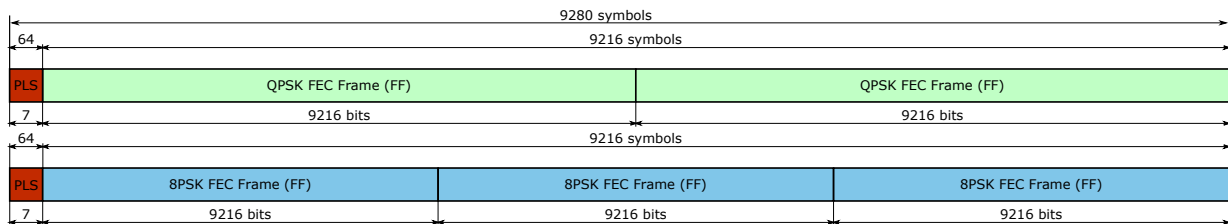


Abbildung 2.4: Physical Layer (PHY) Frames.

dem und Gateway Modem aus Sicht des Protokolls an einigen Stellen ähnlich, durch die systemimmanente Asymmetrie gibt es allerdings wesentliche Unterschiede in der Implementierung. Das Ressourcenmanagement im Gateway-Modem ist aufgrund der zentralen aktiven Rolle wesentlich komplexer als das Ressourcenmanagement, das im LEO-Satellitenmodem benötigt wird. Generell wird in jedem LEO-Satellitenmodem jeweils nur eine Instanz der Kernprozesse gestartet (vgl. Abbildung 2.3), wohingegen im Gateway-Modem alle Prozesse dynamisch gestartet und angehalten werden können. Die zugehörigen Intra-Layer und Inter-Node Interfaces werden ebenfalls dynamisch generiert, so dass im Betrieb verschiedene PHY an- und abgesteckt werden können ("Hot Plugging"). Der dynamische Aufbau von Verbindungen (IP-Sockets) zum NCC, aber auch zu den jeweiligen Satellitenbetreibern wird ebenfalls unterstützt.

### 2.1.4 Übertragungsprotokoll

#### Physical Layer (PHY)

Die physikalische Übertragung über die Funkschnittstelle erfolgt mittels zweier verschiedener Rahmenstrukturen: Synchronisation Frames und Physical Layer Data (PLD) Frames (siehe Abbildung 2.4).

**Synchronisation Frames:** Diese Rahmen werden für die Frequenz- und Phasenanpassung benötigt. Sie bestehen aus 2183 alternierender Binary Phase Shift Keying (BPSK) Symbolen und einer Start of Burst (SoB) Sequenz aus 121 Symbolen mit sehr guten Autokorrelationseigenschaften. Die Gesamtlänge des Rahmens ist 2304 Symbole. Ein Synchronisation Frame wird jeweils zu Beginn bzw. bei Wiederaufnahme einer Übertragung gesendet und danach periodisch zwischen andere Rahmen eingefügt.

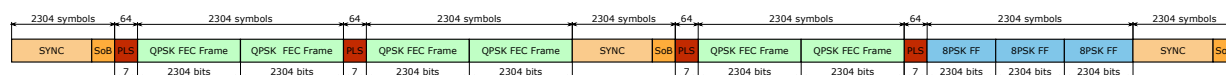


Abbildung 2.5: Beispiel Übertragungssequenz.

**PLD Frames:** Die Gesamtlängen eines PLD Frames betragen 2368 Symbole für den niederratigen Link und 9280 Symbole für den den hochratigen Link. Ein PLD Frame besteht aus einem Physical Layer Signalling (PLS) Header mit 64 Symbole und einem Forward Error Correction (FEC) Frame (FF), also einer Payload, mit entweder 2304 Symbole für den niederratigen Link oder 9216 Symbole für den den hochratigen Link. In den ersten 4 bit können maximal 16 mögliche ModCods codiert werden, die restlichen 4 bit sind reserviert. Der FF besteht entweder aus zwei Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) oder drei 8-Phase-Shift Keying (8-PSK) modulierten Codewörtern, die jeweils 2304 bit Information enthalten.

Der Abstand von periodischen Synchronisation Frames innerhalb einer Sequenz von PLD Frames wird als Synchronisation Frame Distance (SFD) bezeichnet. Eine SFD von 1 bedeutet, dass nach jedem PLD Frame ein Synchronisation Frame gesendet wird. Bei einem Wert von 10 wird nach jedem zehnten PLD Frame ein Synchronisation Frame eingefügt. SFD gleich 0 ist ein Sonderfall: Lediglich zu Beginn der Übertragung wird ein Synchronisation Frame gesendet. In Abbildung 2.5 ist beispielhaft eine SFD von 2 dargestellt.

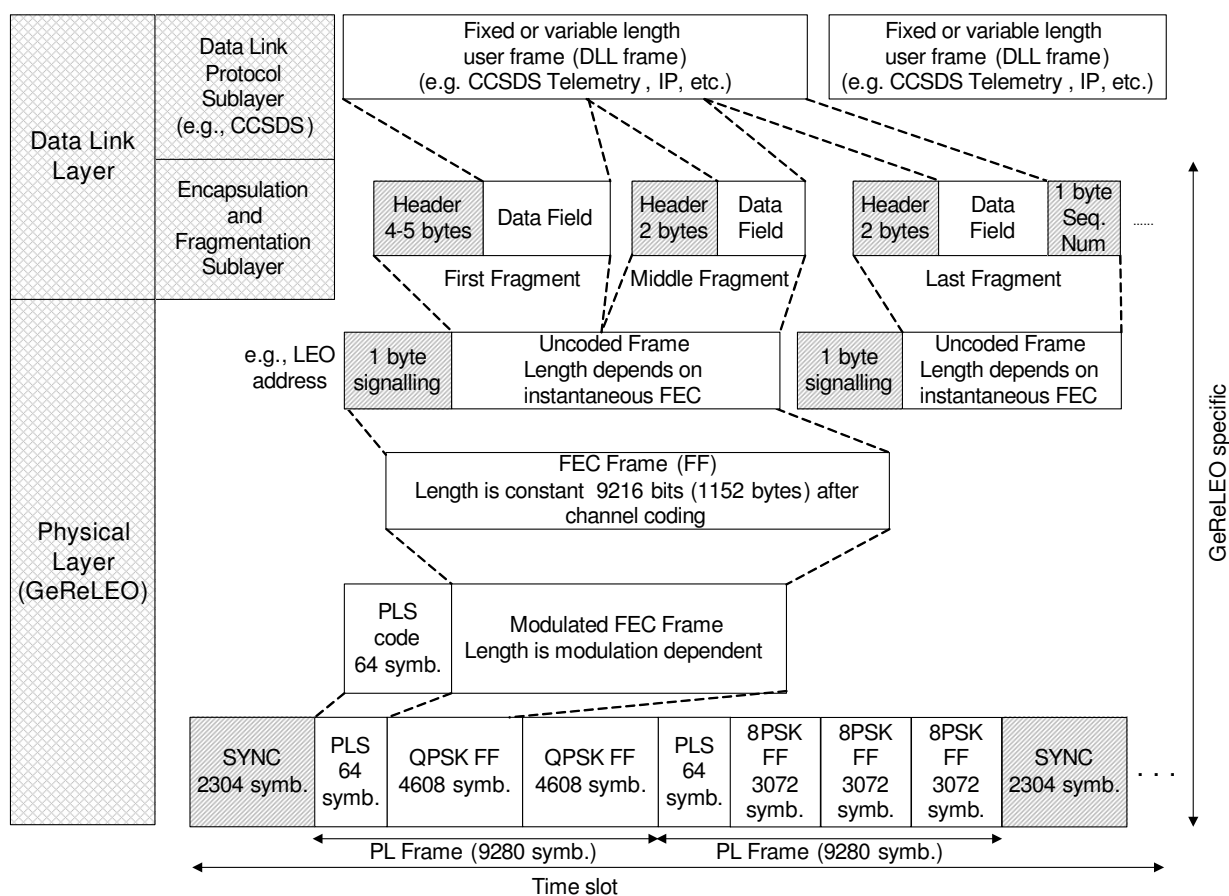
Ein Beamwechsel der Empfangsantenne auf dem GEO Satelliten erfordert eine kurzzeitige Unterbrechung des Downloads von Erdbeobachtungsdaten. Das NCC steuert beide Ereignisse und initiiert auf diese Weise das Einfügen von Synchronisation Frames nach Wiederaufnahme der Übertragung.

Abbildung 2.6 zeigt exemplarisch die Übertragung von Internet Protocol (IP) Datenpaketen oder CCSDS Telemetry über den hochratigen Link. Der "Encapsulation and Fragmentation Sublayer" des DLL erzeugt mit Headern (und Sequenznummern) versehene uncodierte Frames, deren Längen vom gewählten ModCod bzw. den zu erreichenden Längen der FFs abhängen. LDPC Codes erzeugen aus den uncodierten Frames anschließend die FFs. Ähnlich wie in der DVB-S2 Norm wird dem modulierten FF ein PLS Code vorangestellt, so dass ein PL Frame entsteht.

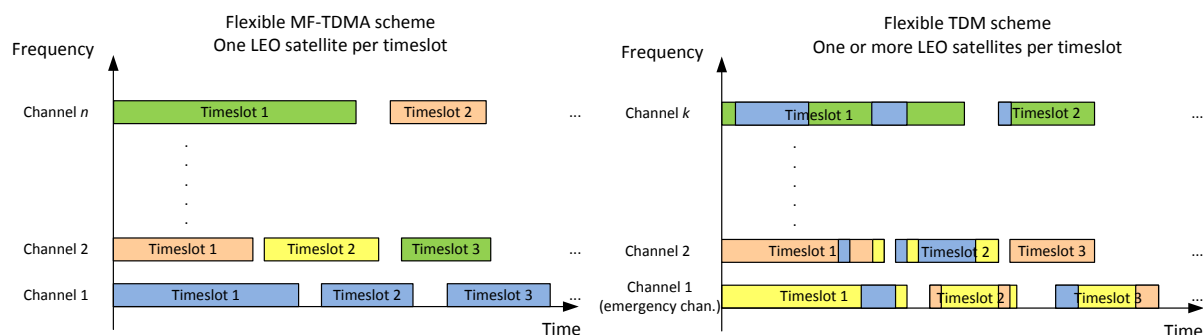
## Vielfachzugriff und Multiplex

Ein wesentlicher Vorteil des GeReLEO Systemkonzepts ist die gleichzeitige Kommunikation mit mehreren LEO Satelliten. Hierfür wurden geeignete Protokolle für den Vielfachzugriff und den Zeitmultiplex entwickelt. Wesentliche Anforderungen ergeben sich aus der Sichtbarkeit der LEO Satelliten und der Berücksichtigung von SLAs.

Sowohl das eingesetzte TDM vom Boden zu den LEO Satelliten als auch das MF-TDMA in der Gegenrichtung basieren auf Zeitschlitzten mit variabler Länge, die von einem Funkressourcenzuweisungsalgorithmus im NCC auf Basis des SLA bestimmt werden. Einschränkungen ergeben sich le-



**Abbildung 2.6:** GeReLEO-MODULOS Protokollschichten und Rahmenstrukturen für den hochratigen Link.



**Abbildung 2.7:** GeReLEO Multi-Frequency Time Division Multiple Access (MF-TDMA) und TDM. Farben symbolisieren die beteiligten LEO Satelliten.

diglich durch die Sichtbarkeitsdauer des jeweiligen LEO Satelliten. Gleichermaßen sind die Schutzzeiten zwischen aufeinander folgenden Zeitslotsen variabel und werden ebenfalls vom NCC zugewiesen.

Abbildung 2.7 zeigt exemplarisch das Prinzip des GeReLEO-Vielfachzugriffs. Beim MF-TDMA wird jeder Zeitslot exklusiv von einem einzigen LEO Satelliten belegt und Frequenzwechsel sind möglich. In der Gegenrichtung können die Zeitslots mit Daten für nahezu beliebig viele LEO Satelliten gefüllt werden. Die gleichzeitige Verwendung mehrerer Frequenzen ist ebenfalls möglich.

Für die Initialisierung eines LEO Modems ist der "Emergency Channel" vorgesehen. Über diesen Kanal werden priorisiert die zu verwendende Trägerfrequenz, Bandbreite, Modulationsparameter, SFD etc. übertragen. Außerdem wird dieser Kanal für die Verteilung der Resource Allocation Table (RAT) genutzt. Falls keine Signalisierungsdaten anstehen kann dieser Kanal auch für andere Nutzdaten verwendet werden.

## Modulations- und Codierungsarten (ModCods)

Der Übertragungskanal zwischen LEO Satellit, GEO Relaisstation und Boden unterliegt im Wesentlichen folgenden Störungen:

- Durch Relativbewegung verursachte zeitvariante Freiraumdämpfung zwischen LEO und GEO;
- Zeitvarianter Antennengewinn auf dem GEO Satellit beim Durchfliegen der Beamkontur;
- Regen-Fading zwischen GEO Satellit und Bodenstation.

Um eine hocheffiziente Ausnutzung des Übertragungskanals bei minimaler Sendeleistung zu erreichen, wurden zwölf ModCods implementiert, die in Tabelle 2.1 und in Tabelle 2.2 aufgeführt sind. Die Anpassung an die Kanaleigenschaften erfolgt entweder in einem variablen oder einem adaptiven Modus:

Tabelle 2.1: ModCods für den niederratigen Link.

code point	modulation	coding rate	bits	spectral efficiency [bit/Hz]	$E_s/N_0$ <sup>[1]</sup> [dB]
0	QPSK	0.25	576	0.5	−1.11
1	QPSK	0.33	768	0.66	0.1
2	8-PSK	0.25	576	0.75	0.65
3	QPSK	0.42	960	0.833	1.21
4	QPSK	0.5	1152	1.0	2.25
5	8-PSK	0.42	960	1.25	2.97
6	QPSK	0.67	1536	1.33	4.25
7	8-PSK	0.56	1280	1.667	4.72
8	8-PSK	0.61	1408	1.833	5.28
9	8-PSK	0.67	1536	2.0	6.01
10	8-PSK	0.72	1664	2.167	6.66
11	8-PSK	0.78	1792	2.33	7.23

<sup>1</sup> at Codeword Error Rate (CER)=  $10^{-6}$ 

**Variable Coding and Modulation (VCM):** Wenn die Freiraumdämpfung des Intersatelliten-Links größer als die durch atmosphärische Störungen verursachte Signalabschwächung ist, dann wird der Signal-Rausch-Abstand durch die deterministische Abstandsänderung zwischen LEO und GEO Satellit dominiert. Eine Rückmeldung der Empfangsqualität an den Sender ist nicht erforderlich, da die zu verwendenden ModCods im Voraus berechnet werden können.

**Adaptive Coding and Modulation (ACM):** Wenn die nicht-deterministischen atmosphärischen Störungen den größten Einfluss auf den Signal-Rausch-Abstand haben, dann werden die einzusetzenden ModCods über einen Rückkanal signalisiert (geschlossene Regelschleife).

Bei beiden Varianten signalisiert das NCC sowohl den Modus als auch die ModCods an das jeweilige Modem auf dem LEO Satelliten.

## 2.1.5 Aufgaben und Aufbau des Data Link Layers (DLLs)

### Aufgaben des DLL

Der vom DLR-KN entwickelte DLL steuert die Funktionen für den Mehrfrequenz-Zeitmultiplex und das Radioressourcenmanagement. Im Einzelnen hat der DLL folgende Aufgaben:

- Quality of Service (QoS) durch Queues, Serviceklassen und einen Scheduler;



Tabelle 2.2: ModCods für den hochratigen Link.

code point	modulation	coding rate	bits	spectral efficiency [bit/Hz]	$E_s/N_0$ <sup>[1]</sup> [dB]
0	QPSK	0.25	2304	0.5	−1.86
1	QPSK	0.33	3072	0.66	−0.55
2	8-PSK	0.25	2304	0.75	−0.1
3	QPSK	0.42	3840	0.833	0.61
4	QPSK	0.5	4608	1.0	1.65
5	8-PSK	0.42	3840	1.25	2.37
6	QPSK	0.67	6144	1.33	3.5
7	8-PSK	0.56	5120	1.667	4.02
8	8-PSK	0.61	5632	1.833	4.63
9	8-PSK	0.67	6144	2.0	5.26
10	8-PSK	0.72	6656	2.167	6.01
11	8-PSK	0.78	7168	2.33	6.78

<sup>1</sup> at CER=  $10^{-6}$ 

- Fragmentierung und Encapsulierung von Datenpaketen, die von der Data I/O Schicht über den ADAP kommen;
- Decapsulierung und Zusammenfügen von Datenpaketen zur Weiterleitung an die Data I/O Schicht;
- Steuerung der ModCod Auswahl abhängig von Kanalzustandsinformationen;
- Steuerung des Kanalzugriffs mittels RATs;
- Identifizierung von GeReLEO-Modems über die DLL Adresse;
- Statistikfunktionen.

Durch eine Generalisierung der Schnittstelle zur physikalischen Schicht ist der DLL in der Lage, multiple und/oder unterschiedliche PHY Layers zu bedienen, die auch unterschiedliche Frontends (z.B. RF und optisch) haben können. In Richtung der höheren Protokollschichten können verschiedene Adaptionmodule verwendet werden, die unterschiedliche Anwenderschnittstellen bieten. Während ein Gateway-Modem typischerweise Transmission Control Protocol (TCP) oder User Datagram Protocol (UDP) als Schnittstelle zum Anwender benötigt, können Satellitenmodems auch Feldbusse (z.B. SpaceWire), SpaceFibre, gängige serielle oder proprietäre Schnittstellen zur Verfügung stellen. Durch die Adaptionmodule werden typischerweise mehrfache Datendienste (Applikationen) unterstützt. Mit diesem Ansatz kann die Protokollsoftware sogar multiple Satellitenbetreiber bedienen.

## Aufbau des DLL

Abbildung 2.8 zeigt schematisch die Module des DLL sowie die Verbindungen zwischen den Modulen. Dabei werden statische und dynamische Verbindungen unterschieden: Statische Verbindungen werden vom BOOT Modul während des Boot-Prozesses anhand der generierten Module erzeugt. Dynamische Verbindungen werden durch Signalisierung ausgelöst, die typischerweise vom Benutzer gesendet wurde.

Unter den zur Laufzeit dynamisch erzeugten Verbindungen sind insbesondere die Verbindungen zwischen den ADAP und den MACTX/MACRX Modulen hervorzuheben. Diese werden durch Benutzeranforderungen erzeugt, die neue Verbindungen zwischen den Satellitenoperatoren und dem jeweiligen LEO Satelliten anfordern.

Die Aufgaben der Module im Data Link Layer (DLL) sind wie folgt:

**BOOT Modul:** Dieses Modul erzeugt und initialisiert sowohl alle anderen Module als auch die jeweiligen Schnittstellen zwischen den Modulen während der Boot-Prozedur. Für die PHY und ADAP Module kann das BOOT Modul eine automatische Hardwareerkennung durchführen. Nach dem Booten wird das Modul vom RESMGMT Modul benutzt, um dynamisch Verbindungen zwischen den MACTX/MACRX Modulen und den ADAP Modulen zu erzeugen oder abzubauen.

**PHYIF Module:** Wie eingangs erwähnt realisiert der PHYIF das Inter-Layer Interface zwischen DLL und physikalischer Schicht (PHY). Im PHYIF ist unter anderem ein Schnittstellen-Multiplexer implementiert, mit dem die Anzahl von Schnittstellen zum PHY reduziert werden kann. Außerdem setzt der PHYIF Hardware-Interrupts vom PHY in Soft-Interrupts um.

**MACTX Module:** Aufgaben der MACTX Module sind die Verwaltung von senderseitigen Warteschlangen, Service-Klassen, Scheduling, und Mechanismen für die Fragmentierung und Encapsulierung von Datenpaketen. Die für die Mehrbenutzerfähigkeit erforderliche Adressierungslogik ist ebenfalls in diesen Modulen implementiert (Multiplexing der Daten von den ADAP Modulen).

**MACRX Module:** Auf der Empfangsseite führen die MACRX Module die Decapsulierung und den Zusammenbau der empfangenen Pakete durch. Ein Paketfilter sorgt für die korrekte Zustellung von den an den jeweiligen Empfänger adressierten Daten (Demultiplexing in Richtung der ADAP Module).

**ACM Module:** Die ACM-Module wählen auf Grundlage der tatsächlichen Kanalbedingungen den am besten passenden ModCod aus. Dabei können diese Module mehrere Verbindungen überwachen.

**RESMGMT Modul:** Telekommandos vom NCC (z.B. für das Kanalzugriffsmanagement) werden vom RESMGMT Modul ausgewertet und in interne Kommandos an die anderen Module umgesetzt. Das beinhaltet auch die Zeitsteuerung von Slots.

**DISPATCHER Modul:** Das Dispatcher Modul routet die Intra-Modem-Signalisierung (d.h. zwischen den Modulen eines Modems) bzw. die Inter-Modem-Signalisierung (d.h. zwischen verschiedenen Modems). Es encodiert bzw. decodiert die Signalisierung und übersetzt sie gegebenenfalls in lokale Schnittstellensignalisierung.

**MGMT Modul:** Übergeordnete Modem-Management-Funktionen werden vom MGMT Modul realisiert. Dazu gehören das Sammeln von Statistiken, die Initialisierung, die Konfiguration von Modulen, das Zurücksetzen von Modulen/Schnittstellen und das Logging.

Die Anzahl und Art der Module kann variabel sein und unterstützt damit die Skalierbarkeit der Bodenstationsmodems. Während die BOOT, RESMGMT, MGMT und DISPATCHER Module immer in genau einer Instanz erzeugt werden, hängt die Instanziierung der anderen Module von der konkret vorhandenen Hardware ab und kann sich u.U. auch während der Laufzeit des Modems ändern (Hotplugfähigkeit). Die Art und Anzahl der ADAP Module ergibt sich aus der vorhandenen Schnittstellenhardware: Ist z.B. ein SpaceWire-Adapter vorhanden, so wird ein ADAP Modul für SpaceWire erzeugt. Die Art und Anzahl der PHYIF und PHY Module entspricht der Beschaffenheit und Anzahl der vorhandenen PHY Hardware.

Die Schnittstelle zum PHY beinhaltet Funktionen zur Abfrage der PHY Konfiguration. Abhängig von der Anzahl der im PHY vorhandenen Sende- und Empfangspfade werden entsprechende MAC-TX, MACRX und ACM Module erzeugt.

Dieser Mechanismus erlaubt es, sowohl Software für Satellitenmodems zu kompilieren, die speziell auf den Satelliten zugeschnitten sind (die automatische Konfiguration im BOOT Modul greift auf fest einkompilierte Daten zu), als auch Modems, die serienmäßig unterschiedliche Konfigurationen unterstützen können (die automatische Konfiguration benutzt ein Probing-Schema). Für Bodenstationsmodems kann der Konfigurationsprozess hotplug-fähig gestaltet werden und die verschiedenen Modemmodule können sogar auf unterschiedlichen CPUs oder Computern laufen.

Die ADAP Module können unterschiedliche Schnittstellen zu den oberen Protokollschichten bedienen. Eine generische ADAP Variante stellt TCP und UDP Verbindungen über IPv4 oder IPv6 zur Verfügung. Diese Variante ist hauptsächlich für Bodenstationsmodems gedacht, die damit multiple Satellitenoperatoren unterstützen, die mittels Fernsteuerung auf das Modem und damit auf ihre LEO Satelliten bzw. Nutzlasten zugreifen.

Das UDP/TCP ADAP Modul bietet verschiedene Modi an, die für jede Verbindung getrennt wählbar sind. Das Modul kann beispielsweise Serverports als Proxy durchschalten, d.h. der Benutzer verbindet sich auf einen bestimmten Port des Bodenstationsmodems (z.B. Port 80). Die Daten werden transparent auf den Satelliten getunnelt und das Satellitenmodem verbindet sich seinerseits mit dem entsprechenden Satellitenequipment, so dass der Benutzer faktisch eine direkte Verbindung zur Satellitenkomponente (z.B. ein Videokameraserver) erhält. Alternativ ist es möglich, IP-fähige Geräte einschließlich des Multiplexings von Portnummern und Protokollen zu benutzen.

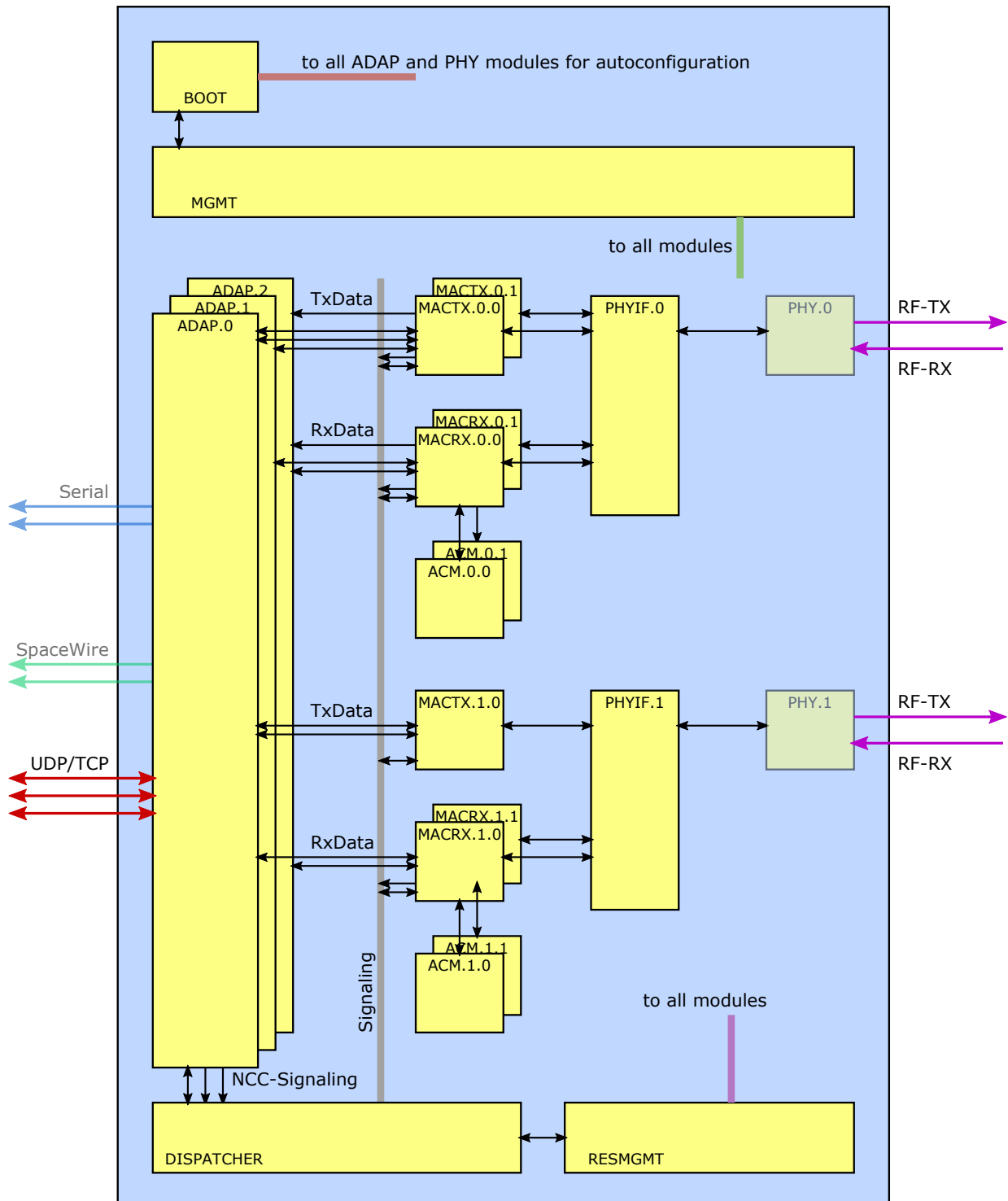


Abbildung 2.8: Software-Blockdiagramm des GeReLEO-MODULOS Modems.

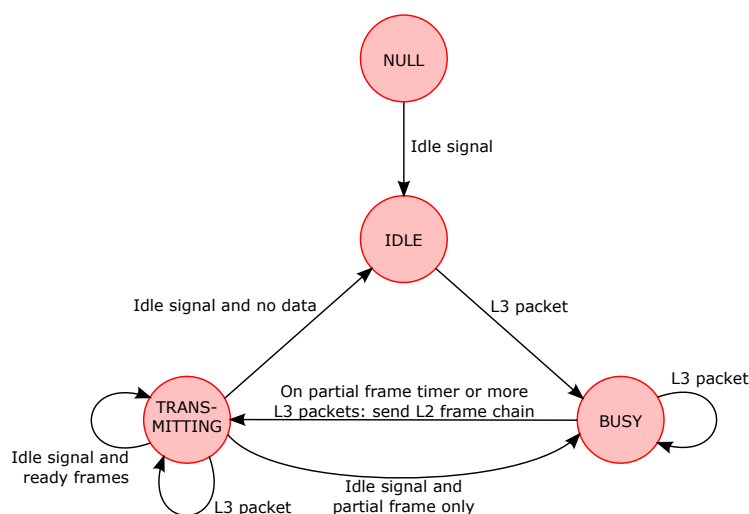


Abbildung 2.9: Zustandsautomat aus der Sicht des PHYIF Moduls.

### Return Link Encapsulation (RLE)

Der DLL benutzt zur Datenübertragung ein entsprechend zugeschnittenes RLE Protokoll [ETS13]. Dabei sind einige Aspekte des Tailoring durch das Systemdesign vorgegeben, andere können an die konkrete Systemimplementierung angepasst werden (siehe Tabelle 2.3).

Weiterhin kann die Liste der Labeltypen und der unterstützten Protokolle durch den Systemimplementierer angepasst werden. Einige der Parameter können nach Inbetriebnahme des System nur schwer oder gar nicht geändert werden, es sei denn Updates an der Software der Satellitenmodems sind möglich.

Zur Inter-Layer Kommunikation zwischen PHY und DLL wurde von DLR-KN ein spezieller Zustandsautomat entwickelt (Abbildung 2.9), der einerseits einen maximalen Durchsatz erlaubt, andererseits relativ einfach zu implementieren ist. Der benutzte Mechanismus erlaubt einen Gegendruck (backpressure) vom PHY bis zur Applikation beim Benutzer (wenn TCP verwendet wird) und damit eine automatische Anpassung der Nutzeranwendung an die Geschwindigkeit der Datenübertragung im System, die bei Verwendung von ACM durchaus variabel sein kann.

Im PHY kann dieser Automat einfach über eine Füllstandssteuerung der Eingangs-FIFO implementiert werden. Die Implementierung auf MACTX Seite ist demgegenüber anspruchsvoller, weil der Automat das Scheduling, die Fragmentierung und das Backpressure in Richtung ADAP steuert. Der vollständige Zustandsautomat ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

Die Komplexität entsteht hier durch die Notwendigkeit zu verhindern, dass nur teilweise gefüllte Rahmen dauerhaft im Scheduler verbleiben. Zu diesem Zweck wird ein Timer verwendet, der bewirkt, dass der Zustand 'TRANSMITTING' aus Abbildung 2.9 in drei Unterzustände zerfällt. Außerdem enthält die Abbildung auch die Aktionen (z.B. Aufruf des Schedulers oder Starten bzw.

Tabelle 2.3: Parametrisierung des RLE Protokolls.

Parameter	Veränderbar?	Beschreibung
MAC Address Length	Y	<b>2 B.</b> Diese Länge kann im Bereich 1 B bis 15 B liegen in Abhängigkeit der maximalen Zahl von Bodenstationen und Satelliten im System.
ADAP Address Length	Y	<b>3 B.</b> Diese Länge kann im Bereich 1 B bis 15 B liegen in Abhängigkeit der maximalen Zahl von Verbindungen pro Link.
Payload Header Map	N	<b>False.</b> Die Labellängen sind fix.
Payload Label	Y	<b>0 B oder 2 B.</b> In Systemen, die nur eine Bodenstation haben, benutzt diese eine Adresse mit Länge 0, so dass im Uplink kein Label notwendig ist. In allen anderen Systemen und im Downlink enthält das Label eine Quell-MAC-Adresse.
Frame Protection	N	<b>None.</b> Das kann nicht geändert werden, weil der Mechanismus in der benutzten RLE Library nicht implementiert ist.
Header Fragmentation	N	<b>True</b>
Trailer Fragmentation	N	<b>True</b>
Large Packets	N	<b>True</b>
Packet CRC	Y	<b>True.</b> Kann nicht auf Packet-by-Packet Basis geändert werden.
Fragment Label	Y	<b>0 B oder 2 B.</b> In Systemen, die nur eine Bodenstation haben, benutzt diese eine Adresse mit Länge 0, so dass im Downlink kein Label notwendig ist. In allen anderen Systemen und im Uplink enthält das Label eine Ziel-MAC-Adresse.
Packet Label	Y	<b>3 B.</b> Das Packet Label enthält immer eine ADAP-Adresse.

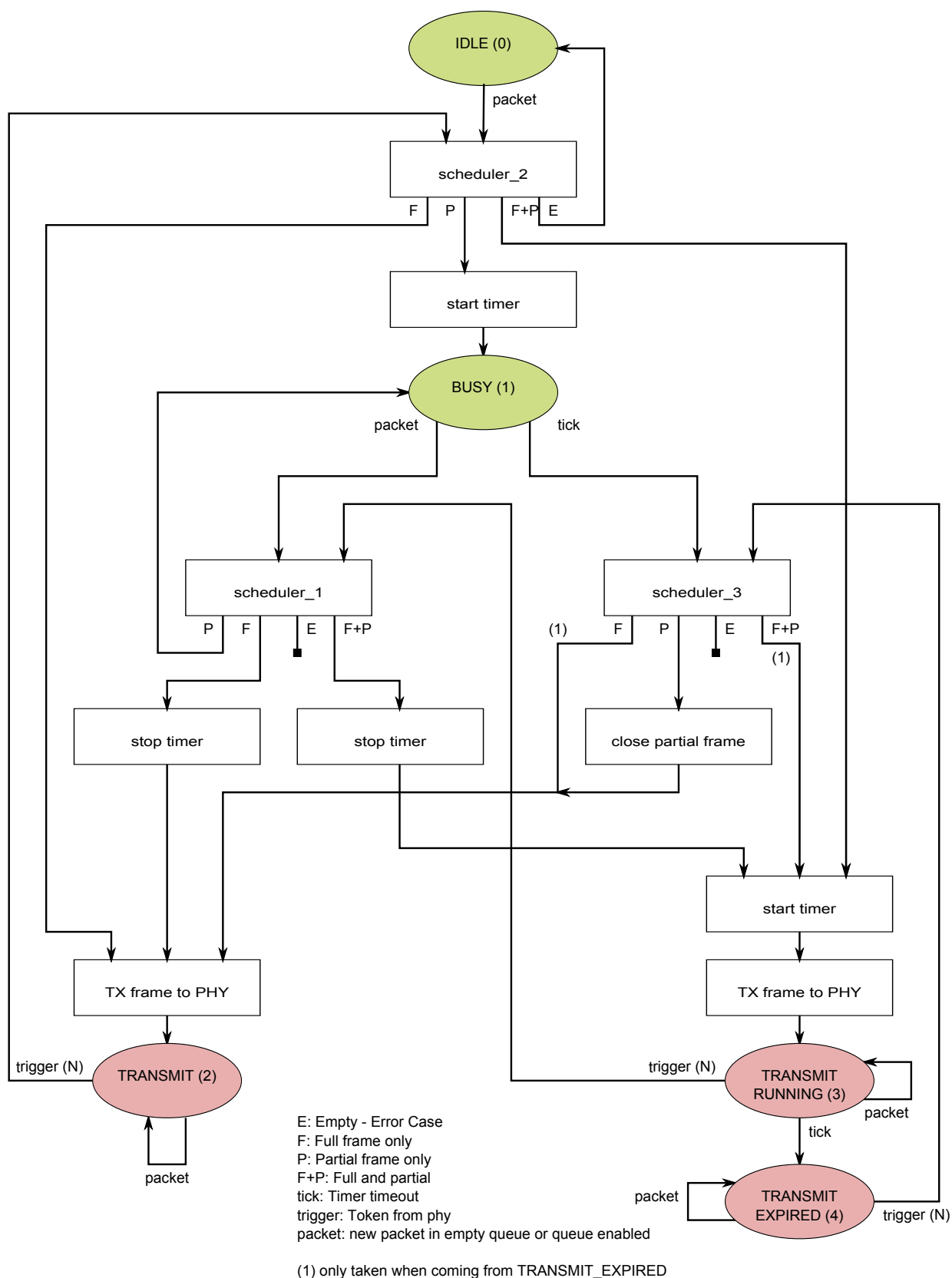


Abbildung 2.10: Kompletter Zustandsautomat im MACTX Modul.

Stoppen des Timers), die bei den diversen Zustandsübergängen auszuführen sind. Der Zustandsautomat wurde mit einer Testsuite verifiziert, die alle Übergänge mindestens einmal auslöst.

### 2.1.6 Entwicklungsumgebung

Die Entwicklung des DLL erfolgte primär auf einem bzw. für ein FreeBSD-System als generische Software.

Für die im GeReLEO-MODULOS Projekt verwendete Hardware wurde allerdings eine andere Entwicklungsumgebung benötigt. Die QNX<sup>®</sup> Software Development Platform besteht aus dem eigentlichen QNX<sup>®</sup> Neutrino<sup>®</sup> Realtime Operating System für die Zielplattform und der QNX<sup>®</sup> Momentics<sup>®</sup> Tool Suite. Letztere ist eine Entwicklungsumgebung mit Cross-Compiler, die auf einem Linux-System (Ubuntu) installiert wurde.

Es stellte sich allerdings heraus, dass die FreeBSD-Implementierung an vielen Stellen an die Besonderheiten von QNX<sup>®</sup> angepasst werden musste. Bei allen notwendigen Änderungen wurde darauf geachtet, dass die Kompatibilität zu FreeBSD erhalten bleibt.

Für die Schnittstelle zum PHY und somit zur Programmable Logic (PL) wurde von Projektpartner IZR eine C-Bibliothek zur Verfügung gestellt, die die von DLR-KN entwickelte Inter-Layer Kommunikation (Zustandsautomat siehe Abbildung 2.9) umsetzt.

### 2.1.7 Verifizierung

Um den DLL und die höheren Protokollschichten unabhängig von der Hardware und unabhängig vom tatsächlichen PHY testen zu können, wurde ein Modell des PHY implementiert, das in Abbildung 2.11 dargestellt ist. Dieser PHY simuliert eine einzelne Bodenstation, einen einzelnen GEO Relaisatelliten und einen einzelnen LEO Satelliten. Die wichtigsten Parameter des simulierten PHY sind:

**Signallaufzeit:** Die Relativbewegung des LEO Satelliten zum GEO Satelliten verursacht zeitvariante Signallaufzeiten, die mit Zeitreihen simuliert werden. Signalverzögerungen im Sender oder im Empfänger bleiben unberücksichtigt.

**Signal-Rausch-Abstand:** Atmosphärische Effekte zwischen GEO Satellit und Bodenstation, das Durchfliegen der Strahlungscharakteristik (Beamkontur) der Antenne auf dem GEO Satelliten und der zeitvariante Abstand zwischen GEO und LEO Satellit verursachen Schwankungen des Signal-Rausch-Abstands, die ebenfalls mit Zeitreihen modelliert werden.

**Datenrate:** Die erreichbaren Datenraten hängen vom verwendeten ModCod ab, der von der Simulation automatisch berechnet wird.



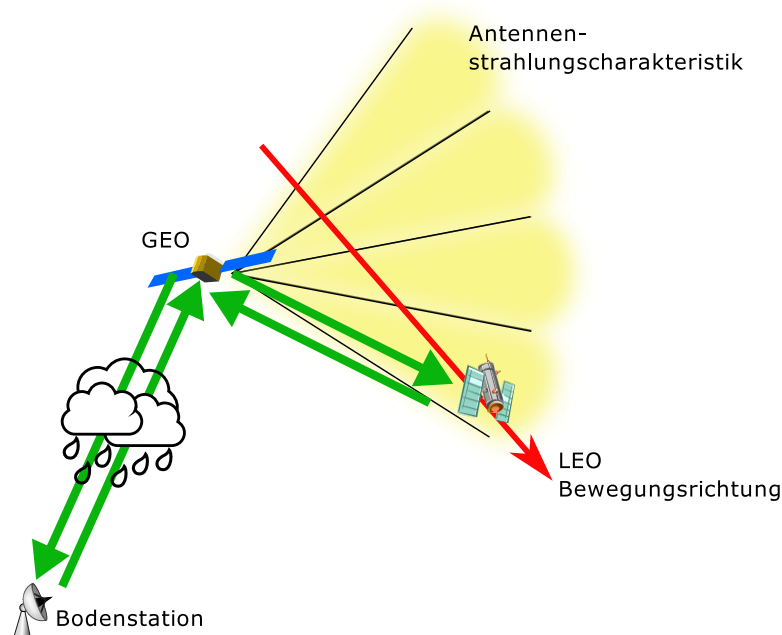


Abbildung 2.11: Modell des PHY für Testzwecke.

**Sichtbarkeit:** Der LEO Satellit ist für den GEO Satellit nur sichtbar, wenn er sich innerhalb der Antennenstrahlungscharakteristik befindet. Beim Umschalten zwischen Antennenbeams kann es zu kurzzeitigen Unterbrechungen kommen. Dieses Verhalten wird ebenfalls als Zeitreihe modelliert.

Die Verifizierung der Software erfolgte mehrstufig:

- Maschinelle formale Verifizierung mit Werkzeugen der Entwicklungsumgebung;
- Entwicklung von dedizierten Testroutinen für die Prüfung von Funktionen;
- Funktionstests auf dem Breadboard-Modem (siehe Abbildung 2.12) mit einem Modell des PHY;
- Funktionstests auf dem Breadboard-Modem mit dem realen PHY;
- Funktionstests auf dem EM des LEO-Satellitenmodems.

Die vollständige Übertragungsstrecke bestehend aus dem EM des LEO Modems, Ka-Band-Down-Convertern für die Emulation des GEO Relaisatelliten und einem Gateway Modem sowie den jeweiligen Radio Frequency (RF) Frontends wurde vom Konsortium anlässlich der 5. Nationalen Konferenz Satellitenkommunikation in Deutschland im März 2017 in Bonn dem anwesendem Fachpublikum präsentiert. Als Datenquellen dienten Terminalfenster für die Übertragung von Textnachrichten bzw. der Datenstrom einer Videokamera (siehe Abbildungen 2.13 und 2.14). Die Ka-Band Intersatelliten-Links (ISLs) wurden für diese Demonstration leitungsgebunden ausgeführt und nicht



**Abbildung 2.12:** Breadboard-Modem für die Softwareentwicklung und Verifizierung.

als Freiraumstrecken mit Sende- und Empfangsantennen. Zudem gab es im Ausstellungsraum keinen Global Positioning System (GPS) Empfang, weswegen die beiden Modems von den jeweiligen Steuerrechnern ("LEO Satellite Bus" und "Network Control Centre") die Zeitreferenz mittels Network Time Protocol (NTP) erhielten.

Bei den Vorbereitungen für die Abschlussdemonstration verlief die Integration der Beiträge aller Projektpartner aufgrund der modularen Softwarearchitektur mit ihren definierten Schnittstellen völlig problemlos. Alle Module waren bereits im Vorfeld jeweils für sich allein und unabhängig voneinander verifiziert worden, so dass es bei der abschließenden Integration keine Überraschungen gab. Das DLL Protokoll erwies sich als voll funktionsfähig und erfüllt die in Abschnitt 1.1.2 genannten Zielsetzungen zur vollen Zufriedenheit. Besonders hervorzuheben ist die Nachhaltigkeit des gewählten Ansatzes, der sowohl plattformunabhängig als auch nahezu beliebig skalierbar ist.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 2.4 zeigt die bewilligten Positionen laut Zuwendungsbescheid sowie die tatsächlichen Ausgaben.

Die angegebenen Positionen untergliedern sich grob wie folgt:

**Material:** Messleitungen, Bauteile für 2. Modem.

**FE-Fremdleistungen:** n.a.

**Personalkosten:** Mitarbeiter Kategorie I.

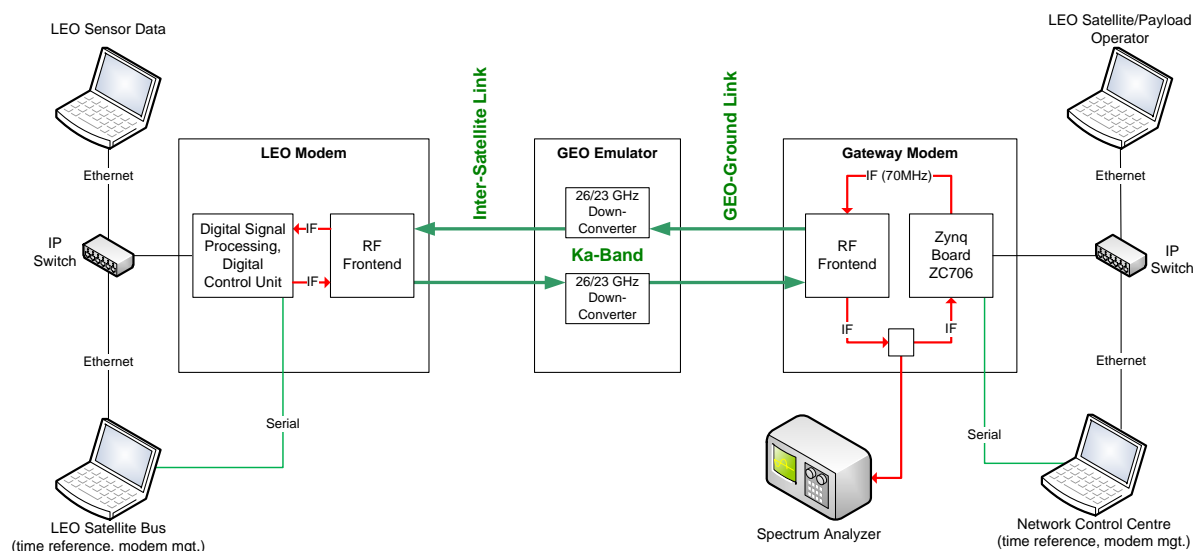


Abbildung 2.13: GeReLEO-MODULOS Demonstrationsaufbau.

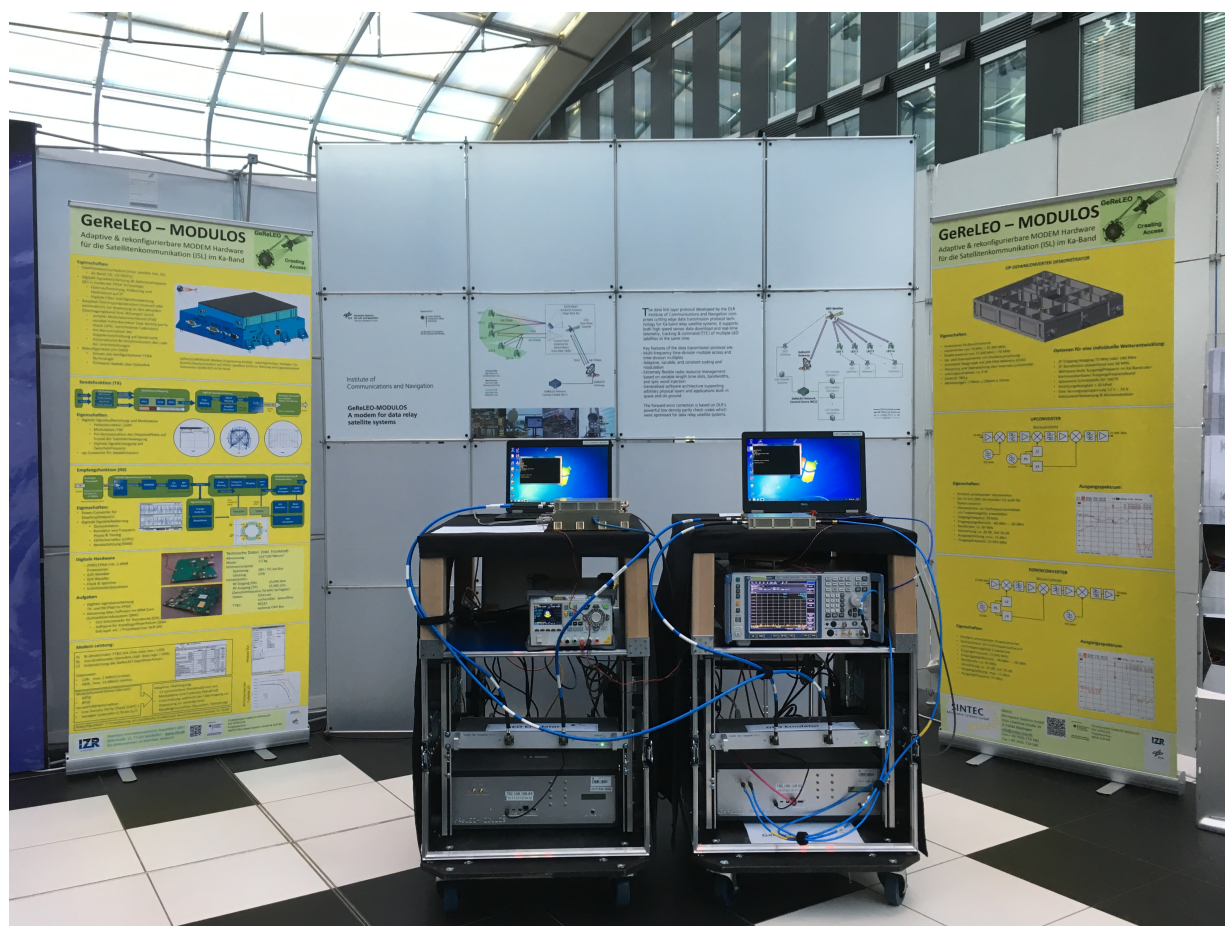


Abbildung 2.14: GeReLEO-MODULOS Ausstellungsstand bei der 5. Nationalen Konferenz Satellitenkommunikation in Deutschland.

**Tabelle 2.4:** Bewilligte Positionen laut Änderungsbescheid vom 10.11.2016 und tatsächliche Ausgaben (jeweils in Euro).

Position	Bezeichnung	bewilligt	tatsächlich
0813	Material	9 250,00	10 546,94
0823	FE-Fremdleistungen	0,00	0,00
0837	Personalkosten	514 389,00	535 719,49
0838	Reisekosten	5 340,00	4 321,07
0847	Vorhabenspezifische Abschreibungen	32 450,00	11 770,04
0850	Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	5 700,00	5 037,50
0856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen	0,00	0,00
	Summe	567 129,00	567 395,04

**Reisekosten:** Reisen zu Projekttreffen und Konferenzen.

**Vorhabenspezifische Abschreibungen:** Hardware Bodenstationsmodem, Rack-Server, Lizenz Vivado Design Suite.

**Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten:** Klimatests.

**Kosten innerbetrieblicher Leistungen:** n.a.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie eingangs beschrieben beschloss das Konsortium zu Projektbeginn, nicht die im Antrag beschriebene FPGA-Hardware zu verwenden, sondern auf eine modernere und performantere Architektur zu setzen. Dadurch ergaben sich zwar diverse Probleme mit der neuen Plattform (z.B. Entwicklungsumgebung, Betriebssystem etc.), allerdings erlaubte dieser Schritt auch die Definition von klaren Schnittstellen und eine Verallgemeinerung der Implementierung, so dass jetzt ein Transfer auf eine andere Hardware ohne Weiteres möglich ist.

Aus Sicht des DLR-KN konnten alle im Projektantrag formulierten Ziele übertroffen werden. Die Ergebnisse haben einen sehr hohen Nachhaltigkeitsgrad und die geleistete Arbeit erscheint deswegen notwendig und angemessen.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen

### 2.4.1 Wissenschaftlicher Nutzen

Für das DLR-KN ergeben sich Verwertungsmöglichkeiten durch die Generierung von Intellectual Property Rights (IPRs), Veröffentlichungen, und durch Beiträge zur Normung/Standardisierung (z.B. beim CCSDS). Mit der Entwicklung der neuen Zugriffs- und der kanaladaptiven Übertragungsverfahren werden effizientere und gleichzeitige robustere Übertragungsverfahren für GEO Datenrelais entwickelt. Das Know-How auf diesem Gebiet kann dadurch deutlich gesteigert werden. Dies bereitet wiederum den Weg für eine künftige Mitgestaltung der Kommunikationseinrichtungen von LEO Satelliten. Die Entwicklungen könnten insbesondere im Rahmen der nationalen Telekommunikationsmission eingesetzt und verifiziert werden.

Im Projekt "Geostationäres Daten-Relais für LEO Satelliten-GEO Satelliten Multibeam Antennen Realisierungs Technologieexperiment" (GeReLEO-SMART) [Wil+15] wird derzeit ein Multibeam-Antennen-System als wissenschaftlich-technische Nutzlast für einen geostationären Satelliten entwickelt und qualifiziert. Möglicherweise kann diese Multibeam-Antenne als Datenrelais für einen stark vereinfachten Experimentalaufbau dienen, bei dem sich das LEO-Satellitenmodem genau so wie das Bodenstationsmodem am Boden befindet.

### 2.4.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Der primäre wirtschaftliche Nutzen des GeReLEO-MODULOS Projekts ist die kommerzielle Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse und Arbeitsergebnisse durch die beiden beteiligten Unternehmen Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt und SINTEC.

Die eingesetzten kanaladaptiven Übertragungsverfahren sind äußerst bandbreiteneffizient und trotzdem robust. Sie eignen sich hervorragend für das im Satellitenkommunikationsbereich zunehmend eingesetzte Ka-Band.

Das GeReLEO-MODULOS Modem ist somit ein wichtiger Bestandteil eines zukunftssicheren Gesamtsystemkonzepts. Der anvisierte Markt ist das Segment der kleinen und vergleichsweise kostengünstigen Satellitenplattformen, mit denen neue Technologien in äußerst kurzen Innovationszyklen entwickelt und verifiziert werden können. Zudem ist absehbar, dass eine Realzeitsteuerung mit möglichst geringen Latenzen bei zukünftigen Missionen von großer Bedeutung sein wird. Somit ergibt sich ein potentieller indirekter Nutzen durch das GeReLEO-MODULOS Modem als Grundlage für Vielzahl von künftigen Anwendungen.

Nicht zuletzt erlaubt das GeReLEO-Konzept direkten Zugriff auf Missionsdaten, ohne auf Liegenschaften außerhalb Deutschlands zurückgreifen zu müssen.

Mögliche deutsche Nutzer der Entwicklungen des GeReLEO-Konzepts sind:

**German Space Operations Center (GSOC):** Das GSOC hat vorwiegend einen Bedarf an GEO Datenrelais für TTC Verbindungen von/zu mehreren LEO Satelliten.

**Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD):** Das DFD hat vorwiegend einen Bedarf an GEO Datenrelais für hochratige Datenverbindungen von mehreren Erdbeobachtungssatelliten.

**Unmanned Aerial Systems (UASs):** Neben dem Bedarf an Relaisverbindungen zwischen LEO und GEO Satelliten ergibt sich hier noch ein möglicher zukünftiger Bedarf an GEO-Datenrelaisfunktionen für Luftfahrzeuge. Beispiele hierfür sind UAS im Rahmen von Erderkundung, Katastropheneinsätzen oder militärischen Anwendungen, die eine direkte Übertragung der Beobachtungs- und TTC-Daten von/zur Kontrollstation benötigen.

## 2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt

In der uns zugänglichen Fachliteratur sowie auf den von uns besuchten Konferenzen und Veranstaltungen wurden keine Arbeiten beschrieben, die mit dem von uns entwickelten Data Link Layer (DLL) vergleichbar sind.

## 2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

### 2.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

- [Don+13] Anton Donner, Hermann Bischl, Lukasz Greda, Zoltán Katona, Martin Brück, Sascha Figur, Bernhard Schönlinner, Thomas Aust, Michael Gräßlin, Marco Haubold, Maik Wiemer, J. Sebastian Knogl und Ralf Wilke. "Geostationary Data Relay Satellites for Earth Observation: The GeReLEO Concept". In: 62. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK)*. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR). Stuttgart, 10.–12. Sep. 2013.
- [Kat+15] Zoltán Katona, Anton Donner, Alessandro Del Bianco, Hartmut Brandt, Michael Gräßlin, Thomas Aust, Heiko Strack, Martin Brück und Norman Kranich. "GeReLEO-MODULOS – Modementwicklung für ein Datenrelaissatellitensystem". In: 4. *Nationale Konferenz "Satellitenkommunikation in Deutschland"*. Vortrag. DLR Raumfahrtmanagement. Bonn: 24.–25. März 2015.
- [Kat+16] Zoltán Katona, Thomas Aust, Anton Donner, Hermann Bischl und Hartmut Brandt. "GeReLEO-MODULOS - A Versatile LEO-Modem for Data Relay Satellite Systems". In: *Proceedings 3rd ESA Workshop on Advanced Flexible Telecom Payloads*. ESA. Noordwijk, The Netherlands, 21.–24. März 2016.

- [Kat12] Zoltán Katona. "GEO Data Relay for Low Earth Orbit Satellites". In: *Proceedings 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*. Baiona, Spain, 5.–7. Sep. 2012, S. 81–88. ISBN: 978-1-4673-2674-2.

## 2.6.2 Präsentationen und Messen

- [Don+17] Anton Donner, Thomas Aust, Martin Brück Michael Gräßlin, Zoltán Katona, Norman Kranich und Heiko Strack. *GeReLEO-MODULOS - A Modem for Data Relay Satellite Systems*. Ausstellung und Demonstration während der 5. Nationalen Konferenz Satellitenkommunikation in Deutschland. Bonn, 28.–29. März 2017.
- [Don14] Anton Donner. *GeReLEO – GEO Data Relay for LEO Satellites*. Vortrag anlässlich eines Besuchs von Airbus Defence and Space. Oberpfaffenhofen, 8. Mai 2014.
- [Don15] Anton Donner. *Low-cost and low-SWaP (size, weight and power) RF-modems for low-earth orbit satellites and UAVs*. Kurzvortrag TransNetAero B2B-Event. Überlingen, 11. März 2015.

## 2.6.3 Geplante Veröffentlichungen

- [Kat+] Zoltán Katona, Michael Gräßlin, Martin Brück und Anton Donner. "GeReLEO-MODULOS: A Flexible LEO Satellite Modem with Ka-Band RF Frontend for a Data Relay Satellite System Concept". In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (). In Vorbereitung.

## 2.6.4 Technische Dokumente

- [Bra+] Hartmut Brandt, Alessandro Del Bianco, Anton Donner, Zoltán Katona und Andreas Wolf. *GeReLEO-MODULOS Software Design Document (SDD)*. Vertraulich. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Oberpfaffenhofen,
- [KB] Zoltán Katona und Hartmut Brandt. *GeReLEO-MODULOS Interface Definition Document (IDD)*. Vertraulich. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Oberpfaffenhofen,

# Abkürzungsverzeichnis

Hinweis: Insofern verfügbar wurden im Rahmen dieses Berichts die von der European Cooperation for Space Standardization (ECSS) definierten Akronyme verwendet.

<b>8-PSK</b>	8-Phase-Shift Keying
<b>ACM</b>	Adaptive Coding and Modulation
<b>ADAP</b>	Adaptation Layer
<b>ADC</b>	Analogue-to-Digital Converter
<b>AMBA</b>	ARM Advanced Microcontroller Bus Architecture
<b>ASIC</b>	Application Specific Integrated Circuit
<b>AXI</b>	Advanced Extensible Interface
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>CCM</b>	Constant Coding and Modulation
<b>CCSDS</b>	Consultative Committee for Space Data Systems
<b>CER</b>	Codeword Error Rate
<b>CPU</b>	Central Processing Unit
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>DAC</b>	Digital-to-Analogue Converter
<b>DLL</b>	Data Link Layer
<b>DFD</b>	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
<b>DLL</b>	Data Link Layer
<b>DLR-KN</b>	DLR-Institut für Kommunikation und Navigation
<b>DVB-RCS</b>	Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite
<b>DVB-S2</b>	Digital Video Broadcasting – Satellite – Second Generation
<b>ECSS</b>	European Cooperation for Space Standardization
<b>EM</b>	Engineering Model
<b>EQM</b>	Engineering Qualification Model
<b>ESA</b>	European Space Agency
<b>ETH</b>	Ethernet
<b>FF</b>	Forward Error Correction (FEC) Frame
<b>FM</b>	Flight Model



<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate Array
<b>GEO</b>	Geostationary Orbit
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GSOC</b>	German Space Operations Center
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IPR</b>	Intellectual Property Right
<b>ISL</b>	Intersatelliten-Link
<b>IZR</b>	Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt
<b>IZR</b>	Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt
<b>LDPC</b>	Low-Density-Parity-Check
<b>LEO</b>	Low Earth Orbit
<b>LNA</b>	Low Noise Amplifier
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MEMS</b>	Micro-Electromechanical Structure
<b>MF-TDMA</b>	Multi-Frequency Time Division Multiple Access
<b>MIL-Bus</b>	MIL-STD-1553
<b>MIO</b>	Memory Input/Output
<b>ModCod</b>	Modulations- und Codierungsart
<b>NCC</b>	Network Control Centre
<b>NTP</b>	Network Time Protocol
<b>PFM</b>	Protoflight Model
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>PHYIF</b>	Physical Layer Interface
<b>PL</b>	Programmable Logic
<b>PLD</b>	Physical Layer Data
<b>PLS</b>	Physical Layer Signalling
<b>PPS</b>	Pulse per Second
<b>PS</b>	Processing System
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RAT</b>	Resource Allocation Table
<b>RESMGMT</b>	Resource Management
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RLE</b>	Return Link Encapsulation
<b>RRM</b>	Radio Resource Management
<b>SEE</b>	Single Event Effect
<b>SEU</b>	Single-Event Upset
<b>SFD</b>	Synchronisation Frame Distance

<b>SINTEC</b>	SINTEC Microwave Systems GmbH
<b>SLA</b>	Service Level Agreement
<b>SMD</b>	Surface Mounted Device
<b>SoB</b>	Start of Burst
<b>SYNCIF</b>	Synchronisation Interface
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexed
<b>TDMA</b>	Time Division Multiplex Access
<b>TRL</b>	Technology Readiness Level
<b>TTC</b>	Telemetry, Tracking and Telecommand
<b>TWTA</b>	Travelling Wave Tube Amplifier
<b>UAS</b>	Unmanned Aerial System
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>VCM</b>	Variable Coding and Modulation

# Literaturverzeichnis

- [Bis+13] Hermann Bischl, Anton Donner, Achim Dreher, Wahid Elmarissi, Stefan Erl, Lukasz Greda, Zoltán Katona und Andreas Winterstein. *Schlussbericht GeReLEO. Förderkennzeichen 50YB0907*. Schlussbericht. Version 1.1. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 3. Apr. 2013. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb13/772160740.pdf>.
- [ECS14] ECSS. *Space engineering – Adoption Notice of ISO 16290, Space systems - Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment*. European Cooperation for Space Standardization (ECSS). Noordwijk, The Netherlands: ESA Requirements & Standards Division, 1. Okt. 2014. URL: <http://ecss.nl>.
- [ETS09] ETSI. *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems*. ETSI EN 301 790 V1.5.1. European Telecommunications Standards Institute. Mai 2009. URL: <http://www.etsi.org>.
- [ETS13] ETSI. *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Return Link Encapsulation (RLE) protocol*. ETSI TS 103 179 V1.1.1. European Telecommunications Standards Institute. Aug. 2013. URL: <http://www.etsi.org>.
- [ETS14a] ETSI. *Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2*. ETSI EN 302 307-1. European Telecommunications Standards Institute. Nov. 2014. URL: <http://www.etsi.org>.
- [ETS14b] ETSI. *Overview of Space Communications Protocols. Report Concerning Space Data System Standards*. CCSDS 130.0-G-3. Version Informational Report, Issue 3. The Consultative Committee for Space Data Systems. Washington, DC, USA, Juli 2014. URL: <http://public.ccsds.org>.
- [Wil+15] Ralf Wilke, Korbinian Schraml, Jörg Pamp, Michael Gräßlin, Thomas Aust, Ulrich Prechtel, Erika Meniconi, Volker Ziegler, Martin Brück, Norman Kranich, Daniel Stemmann, Marco Haubold, Steffen Kurth, Markus Gaitzsch und J.-P. Sommer. "GeReLEO-SMART Project Status". In: *4. Nationale Konferenz "Satellitenkommunikation in Deutschland"*. Vortrag. DLR Raumfahrtmanagement. Bonn: 24.–25. März 2015.

- [Xil13] Xilinx. *Virtex-4 and Virtex-5 QV FPGA CF Package Assembly Location Change. Product Change Notice*. XCN13005. Version v1.0. Xilinx. 25. Feb. 2013.
- [Xil16] Xilinx. *ZC706 Evaluation Board for the Zynq-7000 XC7Z045 All Programmable SoC User Guide*. UG954. Version 1.6. Xilinx. 29. März 2016. URL: [http://www.xilinx.com/support/documentation/boards\\_and\\_kits/zc706/ug954-zc706-eval-board-xc7z045-ap-soc.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/zc706/ug954-zc706-eval-board-xc7z045-ap-soc.pdf).